



UNIVERSIDAD **DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE LAS BASES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN
DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL ÁREA HÚMEDA, DE LOS
EQUIPOS CRÍTICOS EN PLANTA CONCENTRADORA DE FAENA CERRO
NEGRO NORTE (C.N.N.) UBICADA EN LA REGIÓN DE ATACAMA, CIUDAD
DE COPIAPÓ.**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento Industrial

Profesor guía: Sr. Hugo Olmos Naranjo.

Ricardo Nicolás Saavedra González

Copiapó, Chile 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto de título está dedicado a mi papá Leonardo Saavedra Villalón quien fue el que con su esfuerzo me ayudo a pagar mi carrera, a mi mamá quien fue la que me enseñó ser muy responsable, y a la familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano. A mi pareja Diana Makarena Zepeda Campillay que siempre me brindó la perseverancia de seguir estudiando mi carrera ingeniería ejecución mantenimiento industrial y por último a mi abuela Nelly Cerda Trujillo quien siempre confió en mí y me críe desde pequeño con ella.

Atte.

Ricardo Nicolás Saavedra González.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo dar gracias a Dios por darme salud y permitir que haya egresado de la carrera ingeniería ejecución mantenimiento industrial, poder concluirla y seguir especializándome en el rubro.

Dar gracias a mis padres Leonardo Mauricio Saavedra Villalón, Isaura Magaly González Cerda quienes fueron un pilar muy importante para poder desarrollarme como persona y futuro profesional, junto con ellos a mi pareja Diana Makarena Zepeda Campillay quien siempre estuvo ayudándome y apoyándome en el proceso, los instructores quienes respondieron en cada momento cuando lo necesite Alejo Álvarez, Sebastián Astorga, Mauricio Marín, Alejandro lobos, Claudio Tang, Carlo Silva fueron los que siempre estuve trabajando con ellos y enseñándome.

Al igual, a la empresa CAP minería Cerro Negro Norte que confiaron en mí para mostrar mis conocimientos.

Por último agradezco a la Universidad de Atacama Copiapó por el apoyo y disciplina implementada en mis años de estudios. A todos los Profesores de todas las materias de la Carrera, por haberme enseñado parte de sus conocimientos y dado las herramientas fundamentales para poder desenvolverme en el campo laboral.

Atte.

Ricardo Nicolás Saavedra González.

Índice General

CAPÍTULO I.....	1
MARCO INTRODUCTORIO	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Política de la Calidad, Seguridad y Salud Ocupacional, Medio Ambiente y Energía, en CMP, cuál aplica sobre CNN	2
1.3. Descripción del Proyecto	3
1.4. Planteamiento del Problema.....	4
1.5. Objetivos del Estudio	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. Descripción de la Empresa.....	5
1.6.1. Historia.....	5
1.6.2. Misión	7
1.6.3. Visión	8
1.6.4. Cartera de Productos Cap. Minería	8
1.6.5. Destino de los Productos	10
1.6.6. Situación del Mercado.....	10
1.7. Plan de Crecimiento CAP Minería.....	13
1.7.1. Operaciones.....	14
1.7.2. Bases que Sustentan Plan de Crecimiento	16
1.7.2.1. Mercado.....	17
1.7.2.2. Recursos Mineros.....	18
1.7.2.3. Situación Financiera CAP Minería	19
1.7.2.4. Recurso Humano	20
CAPÍTULO II	23
MARCO TEÓRICO	23
2.1. Ingeniería en Mantenimiento	23
2.1.1. Definición de Mantenimiento	23
2.1.2. Evolución del Mantenimiento.....	24
2.1.3. Tipos de Mantenimiento	25

2.1.3.1. Mantenimiento Correctivo	26
2.1.3.2. Mantenimiento Preventivo	27
2.1.3.3. Mantenimiento Predictivo	27
2.1.3.4. Criticidad de los Equipos	27
2.5. Mantenimiento Predictivo	29
2.5.1. Características del Mantenimiento Predictivo	29
2.5.2. Implementación del Mantenimiento Predictivo	29
2.5.3. Técnicas de Mantenimiento Predictivo	31
2.5.4. Ventajas del Mantenimiento Predictivo	32
2.5.5. Desventajas del Mantenimiento Predictivo	32
2.6. Mantenimiento Predictivo por Vibraciones	32
2.6.1. Definición de Vibración	32
2.6.2. Características de las Vibraciones	32
2.6.3. Parámetros en la Medición de la Vibración en Equipos Rotativos	33
2.6.4. Medida Global de la Vibración	34
2.6.5. Etapas de la Medición	34
2.6.6. Norma ISO 2372	35
2.6.8. Severidad Vibratoria	39
2.7. Termografía	39
2.7.1. Definición de Termografía	39
2.7.2. Métodos de Transferencia de Calor	39
2.7.3. Espectro Electromagnético	40
2.7.4. Radiación Infrarroja	41
2.7.5. Cámara Termográfica	42
2.7.6. Inspecciones Eléctricas con Termografía	42
2.8. Importancia del Mantenimiento	44
2.8.1. Ventajas y Desventajas	45
CAPÍTULO III	46
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD	46
3.1. Análisis de Criticidad	46
3.2. Operacionalización de Variables	48

3.2.1. Variable Independiente	48
3.2.1.1. Indicadores de la Variable Independiente	48
3.2.2. Variable Dependiente.....	48
3.2.2.1. Indicador de la Variable Dependiente.....	49
3.3. Diseño de la Investigación	51
3.4. Unidad de Estudio.....	51
3.4.1. Población.....	51
3.4.2. Muestra.....	51
3.4.3. Técnicas, Instrumentos y Procedimientos de Recolección de Datos	52
3.5. Métodos, Instrumentos y Procedimientos de Análisis de Datos	53
3.5.1. Programas para Análisis de Datos:	53
3.5.2. Procedimiento	53
CAPÍTULO IV	54
ESTUDIO ECONÓMICO.....	54
4.1. Análisis Inicial del Proceso de Elaboración del Presupuesto de Capital	54
4.1.1. Política Interna	54
4.1.2. Procedimiento de Elaboración	54
4.1.3. Costo Total de Eficiencia/Ineficiencia de Compras de Repuestos.....	55
4.1.4. Disponibilidad y Confiabilidad de Equipos Críticos	56
4.1.5. Aplicación de Herramientas de Confiabilidad	57
4.1.6. Evaluación de la Situación Actual	69
4.1.6.1. Materia de Disponibilidad y Confiabilidad.....	71
CAPÍTULO V.....	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones.....	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXO A.....	78
TABLA DE CRITICIDAD DE EQUIPOS PLANTA CONCENTRADORA	78
ANEXO B.....	80

EFICIENCIA DE GASTO DE COMPONENTES CAPITALIZABLES
PRESUPUESTADO80

Índice de Ecuaciones

(Ecuación N°2.1)	41
(Ecuación N°2.2)	41
(Ecuación N°3.1)	46
(Ecuación N°3.2)	51

Índice de Figuras

Figura N°1.1: Conformación Grupo CAP S.A.	6
Figura N°1.2: Centros de Operación.....	7
Figura N°1.3: Productos comercializados.....	9
Figura N°1.4: Crecimiento población urbana.	11
Figura N°1.5: Crecimiento mundial población urbana.	12
Figura N°1.6: Crecimiento del consumo de acero.	12
Figura N°2.1: Tipos de Mantenimiento.	26
Figura N°2.3: Montajes más comunes.	35
Figura N°2.4: Montajes más comunes.	36
Figura N°2.5: Anomalía en instalación eléctrica.	44
Figura N°4.1: Proceso de cinco etapas para la toma de decisión de compra de repuestos críticos capitalizables.	58
Figura N°4.2: Curva de confiabilidad de pernos críticos-tapa de descarga.	65
Figura N°4.3: Curva de confiabilidad-estatores de molino.	66

Índice de Gráficos

Gráfico N°1.1: Oferta y demanda de hierro	13
Gráfico N°1.2: Tendencias consumo países.	13
Gráfico N°1.3: Producción CAP Minería	14
Gráfico N°1.4: Producción CAP Minería	15
Gráfico N°1.5: Crecimiento de la población urbana y rural de China.	17
Gráfico N°1.6: Importación mineral hierro y producción.....	18
Gráfico N°1.7: Nivel de Sondajes.....	19
Gráfico N°1.8: Producción versus dotación de personal. HACE 10 AÑOS ATRAS	21
Gráfico N°1.9: Dotación de personal versus crecimiento de producción.	22
Gráfico N°4.1: Disponibilidad real, disponibilidad Budget y confiabilidad de molino bolas #4. Período 2014-2017.....	72
Gráfico N°4.2: Disponibilidad real, disponibilidad Budget y confiabilidad de molino de bolas #1. Período 2014-2017.	73

Índice de Tablas

Tabla N°1.1: Operaciones y productos.	8
Tabla N°1.2: Proporción de embarques CAP.	10
Tabla N°1.3: Producción por tipo de proyecto.	16
Tabla N°2.1: Matriz con ponderaciones.	28
Tabla N°2.2: Matriz con ponderaciones.	40
Tabla N°2.3: Criticidad de temperatura NETA.	43
Tabla N°3.1: Operacionalización de variables.	50
Tabla N°3.2: Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.	52
Tabla N°4.1: Eficiencia compra equipos críticos en planta concentradora.	55
Tabla N°4.2: Eficiencia en la ejecución de compra de repuestos críticos de planta concentradora.	56
Tabla N°4.3: Disponibilidad y confiabilidad equipos críticos de planta concentradora. Período 2014-2016.	56
Tabla N°4.4: Análisis de criticidad.	59
Tabla N°4.5: Rango de evaluación de criticidad.	60
Tabla N°4.6: Calificación del índice de criticidad para priorización de activos.	61
Tabla N°4.7: Sistemas y componentes críticos.	62
Tabla N°4.8: Matriz de componentes monitoriables y con historial de fallas.	64
Tabla N°4.9: Matriz de riesgo crítico.	67
Tabla N°4.10: Condición de componentes críticos y nivel de riesgo.	68
Tabla N°4.11: Matriz de priorización y calendarización para compra de repuestos.	69
Tabla N°4.12: Eficiencia de gasto CAPEX, PERÍODO 2014-2017.	70
Tabla N°4.13: Impacto de detenciones por espera de repuestos. Período 2014-2017.	71
Tabla N°4.14: Disponibilidad y confiabilidad de equipos críticos de planta concentradora. Período 2014-2017.	72
Tabla N°4.15: Resumen con indicadores antes y después de la mejora.	74

RESUMEN

Las industrias intensivas en activos físicos como las empresas mineras, hoy en día enfrentan grandes desafíos que impulsan a encontrar nuevas formas de incrementar la producción y reducir los costos operativos. En un esfuerzo por incluir tal enfoque, el presente trabajo de titulación tuvo como objetivo desarrollar las bases para la implementación de un plan de Mantenimiento Predictivo en los equipos críticos del área húmeda de faena Cerro Negro Norte (C.N.N.) Lo anterior nace con la finalidad de prevenir y predecir fallas en los equipos críticos, para así mejorar la confiabilidad del proceso productivo relacionado a la producción de hierro. Para que un programa de mantenimiento predictivo tenga éxito se requiere compromiso absoluto de la alta gerencia, buenos informes e historia de los equipos, personal dedicado, criticidad asignada y con seguimiento, un buen sistema apoyado por computadora y rutas de mantenimiento. Seguido de esto es necesario generar un modelamiento del proceso de optimización del presupuesto de componentes capitalizables el cual se realiza empleando herramientas de confiabilidad operacional como; el análisis de criticidad, el análisis de confiabilidad y mediante una matriz de evaluación de riesgo crítico. Para lograr lo antes mencionado, se utilizan dos instrumentos de medición. El primero es el analizador de vibraciones Microlog CMXA 80, este instrumento se utiliza para hacer inspecciones a equipos rotativos. El segundo instrumento corresponde a una cámara térmica con tecnología de ultrasonido marca Olympus Epoch 1000. El proyecto de título, entrega información bibliográfica sobre técnicas para reconocer equipos críticos, beneficios de la mantención a condición de operación, dificultades, normas, técnicas y pautas a utilizar en el desarrollo de las bases para la implementación de un plan de Mantenimiento Predictivo. El proceso de implementación de las herramientas de confiabilidad contempla cinco etapas, que incluye una matriz de riesgo crítico, la cual determina la prioridad de compra y posterior calendarización de la intervención. Actualmente, la metodología ayuda a la toma de decisiones de compra, en base la condición objetiva de los componentes críticos, además de predecir de manera oportuna y certera las intervenciones planeadas. Por tanto se concluye que, efectivamente, la aplicación de las herramientas de confiabilidad permite optimizar el proceso de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, evidenciado por el incremento del 11% en la eficiencia de ejecución del presupuesto del año 2017, comparado con el promedio de los tres años anteriores. Finalmente, al analizar la situación inicial del

ejercicio de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, se logra identificar que los criterios utilizados para la compra de repuestos y equipos críticos eran ineficientes, ya que se basaba principalmente en la experiencia del personal. Esta práctica empírica privada de criterios técnicos generó pérdidas por lucro cesante los años 2014 y 2015. Llegando a representar el 58% del presupuesto anual del año 2017, debido a la indisponibilidad de los activos por la espera de repuestos.

Palabras claves: Tipos de mantenimiento, confiabilidad, análisis componente de riesgo crítico, CAPEX, MTBF.

CAPÍTULO I

MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Antecedentes Generales

Para comenzar, la humanidad elabora e fabrica para que sea mantenido, si no se deteriora por la acción natural del paso del tiempo, es decir, la mantención como concepto ha estado presente desde el principio de la historia.

Desde los tiempos de la revolución industrial y hasta 1914 la gestión de mantención prácticamente no existía, cada reparación o ajuste era ejecutado por el mismo personal de operación.

Bajo las consecuencias derivadas de la primera guerra mundial y la producción en serie impulsada por Ford, las industrias tuvieron que adoptar tiempos mínimos de reparación. Se creó un departamento, dentro de la organización empresarial, subordinado de operaciones, que se encargaban del cumplimiento de mantención cuando algo dejaba de funcionar, hoy conocida como mantención correctiva.

En el cuadro anterior se mantuvo hasta la década de los treinta, y en función de la segunda guerra mundial, ya no solo fue necesario reparar sino que además, se requería tratar de prevenir fallas, de ahí nació la denominada mantención preventiva, que junto con la correctiva constituía el escenario de esa época. Además, a nivel jerárquico del departamento de mantención, se instauró en el mismo escalón que el de operaciones.

En los años cincuenta, debido a la post-guerra, el avance en la industria electrónica y la aviación comercial, se crea un órgano de asesoramiento de la producción, conocida como Ingeniería en Mantenimiento, la cual se encarga de estudiar las causas y defectos de las averías.

Con la masificación de los computadores en el año 1966, y el fortalecimiento de organizaciones nacionales de Ingeniería en mantenimiento, esta evolucionó a la prevención y predicción de fallas.

A partir de 1980, y actualmente debido al avance en la computación y microprocesadores, los organismos de mantención se han visto en la necesidad de procesar su información en software de mantención, lo que hace más eficiente la comunicación organizacional en cada nivel de la empresa [2].

En efecto el mantenimiento ha ido avanzando de la mano con el desarrollo tecnológico de la civilización, es por ello que las empresas líderes en sus mercados han ido cambiando su sistema de gestión de mantenimiento.

Hoy en día, tanto la competencia que surge entre las empresas y las normas de calidad, tiende a transformar los departamentos de mantención, de un departamento que espera las fallas de los equipos, para luego repararlo, asimismo para cambiar las piezas de modo repetitivo, a uno que pueda ser más activo, es decir, que pueda ser un verdadero aporte a la productividad total de la empresa.

Con respecto al mantenimiento predictivo surge en la década de los 90, y se funda en la condición de los equipos, para ello hay que hacer mediciones de alguna variable física relevante que nos pueda dar una señal de alguna falla potencial, de esta forma se planificara una mantención de ahí su consigna “el mantenimiento adecuado en el momento adecuado.”

Con estos antecedentes el objetivo de este trabajo es desarrollar, las bases para la “implementación de un plan de Mantenimiento Predictivo en el área húmeda, de los equipos críticos en planta concentradora de faena Cerro Negro Norte (C.N.N.)”.

1.2. Política de la Calidad, Seguridad y Salud Ocupacional, Medio Ambiente y Energía, en CMP, cuál aplica sobre CNN

En primer lugar la Compañía Minera del Pacífico S.A., productor comercializador de concentrado magnético de alta ley de pellets de hierro. En la permanente búsqueda, de alternativa de diversificación minera y nuevos negocios, la cual fomenta una cultura de innovación.

Asume la responsabilidad de liderar y promover la implementación de esta política en todos los niveles, incluyendo a sus contratistas, como premisa fundamental para alcanzar la excelencia de sus operaciones, basándose en el mejoramiento continuo del sistema de gestión, comprometiéndose con el cumplimiento de los pilares básicos que se detallaran a continuación.

- Proporcionar las condiciones de trabajos seguras y saludables para la prevención de lesiones y deterioros de salud, y eliminar los peligros y reducir los riesgos relacionados con el trabajo.

- Proteger al medioambiente, previniendo la contaminación, mediante la reducción de los residuos y su uso sostenible de los recursos naturales, con su objetivo de alcanzar la mejora de su desempeño ambiental.
- Efectuar una constante revisión de sus procesos coherente con la planificación estratégica de la compañía, que permita satisfacer los requerimientos aplicables a sus procesos, tales como productos y servicios, así mismo también dar respuestas a las necesidades y expectativas de los clientes.
- Mejorar continuamente su desempeño energéticos, identificándolos y evaluándolos con el consumo de energía, para mejorar y optimizar los procesos, que incentiven los usos y compras de los servicios y productos energéticos y eficientes de diseño.
- Además de asegurar la disponibilidad de información y de los recursos necesarios para alcanzar los objetivos y metas energéticas.
- Dar cumplimiento a la normativa legal aplicable y a otros requisitos suscritos por la organización en materias de seguridad, salud ocupacional, uso y consumo de energía, eficiencia energética, medioambiente y a los contractuales aplicables al producto.
- Contribuir con las comunidades, y entornos de sus faenas en el desarrollo de programas de mejoras y apoyos en materias ambientales y sociales.
- Mantener los canales efectivos de comunicación en todos los niveles de la organización, con empresas contratistas y otras partes interesadas externas, conjuntamente con asegurar la consulta y la participación de los trabajadores en materias de seguridad y salud ocupacional.

1.3. Descripción del Proyecto

El proyecto consiste en desarrollar las bases para la implementación de un plan de Mantenimiento Predictivo en el área húmeda, de los equipos críticos en planta concentradora de faena Cerro Negro Norte (C.N.N.) ubicada en Copiapó, Región de Atacama, Chile. Con anterioridad, el medio de instrumentos que permiten medir vibraciones y radiación electromagnética de tipo térmica de los diferentes componentes del proceso productivo.

La mantención predictiva tiene como objetivo mejorar la disponibilidad y confiabilidad del proceso productivo. Con lo anterior, es necesario tener la instrumentación necesaria que permita medir una propiedad intrínseca de los equipos más significativos de la producción industrial, éstas mediciones permiten diagnosticar y pronosticar fallas potenciales y funcionales, para tomar las medidas pertinentes a cada caso.

La importancia de adoptar nuevas técnicas en los sistemas de gestión de mantención permite obtener ventajas competitivas entre sus pares, ya que, influye directamente en los costos, precios y calidad de un sistema empresarial.

Por lo que el Departamento de Mantención de la empresa desea avanzar en su sistema de gestión de mantenimiento. Para ello, realizan dos estrategias de mantención, la correctiva y preventiva, siendo la última utilizada con menor frecuencia. En el siguiente paso de este sistema de gestión es iniciar las bases para la mantención predictiva dentro de las instalaciones.

En tercer lugar se desarrollara la mantención predictiva, que se utilizarán dos instrumentos de medición.

- El primero es el analizador de vibraciones Microlog CMXA 80, este instrumento se utilizara para hacer inspecciones a equipos rotativos.
- El segundo instrumento corresponde a una cámara térmica con tecnología de ultrasonido marca Olympus Epoch 1000.
- El estudio además entrega información bibliográfica sobre técnicas para reconocer equipos críticos, beneficios de la mantención a condición, dificultades, normas, técnicas y pautas que se utilizara en el desarrollo de las bases para la implementación de un plan de Mantenimiento Predictivo.

Este proyecto, desarrolla las primeras bases para un plan de mantenimiento predictivo. En este contexto, se describen los procedimientos técnicos para generar pautas de Mantención Predictiva, identificando normas para la recopilación de datos y evaluación de los equipos, además de crear, registrar y evaluar rutas de medición dentro de la planta.

1.4. Planteamiento del Problema

La mantención predictiva tiene como objetivo mejorar la disponibilidad y confiabilidad del proceso productivo. Para lograr lo anterior, es importante tener los equipos e

instrumentación de mantenimiento predictivo en buenas condiciones, tenerlos en un lugar seguro, para poder utilizarlos cuando sea necesario, de esta manera poder otorgar un diagnóstico seguro de las posibles fallas del equipo, para tomar las medidas preventivas en cada caso cuando corresponda.

La importancia de adoptar nuevas técnicas en los sistemas de gestión de mantención permite obtener ventajas competitivas entre sus pares, ya que esta influye directamente en los costos, precios y calidad de un sistema empresarial.

1.5. Objetivos del Estudio

1.5.1. Objetivo General

Desarrollar las bases para la implementación de un plan de mantenimiento predictivo en el área húmeda, de los equipos críticos en planta concentradora de la faena Cerro Negro Norte (C.N.N.) ubicada en la Región de Atacama, ciudad de Copiapó, adaptándose a la realidad técnica y operativa en virtud de sus procesos productivos y equipos involucrados.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Generar pautas y utilización de normas para la recopilación de datos de los equipos críticos en el área húmeda de la minera en faena Cerro Negro Norte. (C.N.N.)
- Desarrollar criterios de evaluación de variables de los equipos más críticos de la minera, con el propósito de prevenir y/o predecir posibles fallas.
- Crear, registrar y evaluar rutas de medición de los equipos más críticos dentro del área húmeda de minera en faena Cerro Negro Norte. (C.N.N.) para garantizar su funcionamiento y detección por fallas imprevistas.

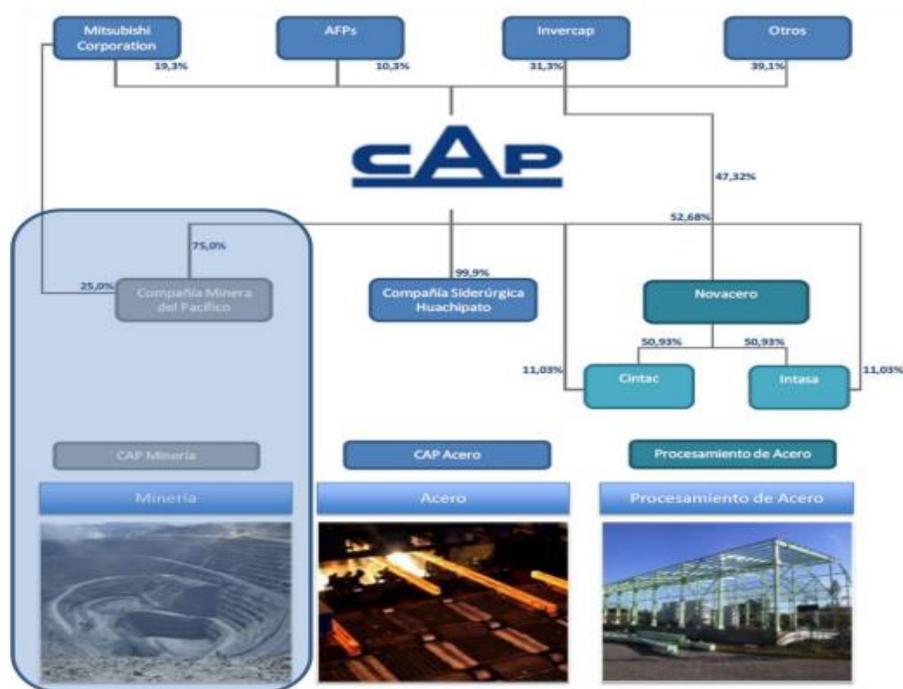
1.6. Descripción de la Empresa

1.6.1. Historia

CAP. Minería es una de las filiales del Holding CAP S.A., junto a las empresas CAP. Acero y Procesamiento de Acero. Participa de toda la cadena de valor del acero con sus empresas destinadas a la producción de minerales de fierro, acero y productos terminados [4].

Las empresas que conforman el Holding son: CAP Minería, que desarrolla el negocio de producción de minerales de hierro, a través de Compañía Minera del Pacífico (CMP) y sus filiales, siendo el mayor productor de minerales de hierro y pellets en la costa del Pacífico, con amplios recursos y reservas conocidas y en permanente expansión por programas de explotación, que garantizan la continuidad de operaciones. CAP Acero, que desarrolla sus actividades a través de la filial Compañía Siderúrgica Huachipato S.A., tiene sus instalaciones en la ciudad de Talcahuano. Cía. Siderúrgica Huachipato (CSH) es la principal siderúrgica del país que elabora sus productos a partir de materias primas existentes en la naturaleza (mineral de hierro, carbón y caliza), garantizando aceros de alta pureza y calidad. CAP Soluciones en Acero, que desarrolla su negocio a través de NOVACERO y subsidiarias. Su principal objetivo es crear soluciones en acero principalmente para los sectores de la construcción, industria e infraestructura tanto en Chile como en el extranjero. La figura 1.1, muestra la conformación del grupo CAP S. A. tanto en la participación de los dueños, como las empresas que lo conforman.

Figura N°1.1: Conformación Grupo CAP S.A.



Fuente: www.cap.cl.

Las actividades de CAP Minería se centran principalmente entre las regiones de Atacama y Coquimbo, zonas donde posee minas, plantas y puertos de embarque, todos de

su propiedad. A continuación, la figura 1.2 muestra los centros donde opera y las instalaciones que posee.

Figura N°1.2: Centros de Operación.



Fuente: www.cap.cl.

1.6.2. Misión

“Desarrollar negocios basándonos en nuestras fortalezas e infraestructura, y las oportunidades del mercado, así como en la capacidad de adecuación oportuna a los cambios tecnológicos y de generación de innovaciones estratégicas de nuestro capital humano, asegurando proyección de largo plazo y aportando valor sostenible a nuestros grupos de interés internos y externos”.

1.6.3. Visión

“Ser un líder en calidad y servicios al cliente en minería, su cadena de valor y en emprendimientos relacionados, para aportar significativamente al crecimiento y desarrollo sustentable de Chile y los países en los que opera”.

1.6.4. Cartera de Productos Cap. Minería

Los productos generados en las distintas faenas de CAP. Minería son:

Pellet Feed: Es un concentrado de hierro de bajo tamaño. Se utiliza como carga al proceso de aglomeración y producción de pellets, se utiliza como insumo en los altos hornos.

Pellet Básico: Aglomerado de finos de mineral de hierro, en forma de nódulos. Son manufacturados con un aditivo especial de álcali como caliza o dolomita, en una planta de pellet. Se utiliza en carga directa a altos hornos para producción de arrabio.

Pellet RD: Mineral de hierro aglomerado en forma de pellets, para uso en procesos de reducción directa, que requiere de menores impurezas y mayores contenidos de hierro en el alto horno. Se utiliza en procesos siderúrgicos por método de reducción directa, que entregan como producto hierro esponja.

Granzas: Mineral de hierro comercializable. Es el producto tradicional de las minas de hierro, generalmente se le somete a un proceso de beneficio para separarlo de la ganga, aumentando así su ley de hierro. Se utiliza en la carga directa para producción de arrabio.

Finos: Mineral de hierro comercializable que debe ser generalmente aglomerado por sinterización para posteriormente alimentar un alto horno. Usado en proceso sinterización para producir nódulos (sinter) como carga directa a alto horno, para producción de arrabio.

La tabla 1.1 muestra las operaciones actuales y los tipos de productos generados.

Tabla N°1.1: Operaciones y productos.

Faena Producto	Cerro Negro Norte	Minera Hierro Atacama(planta magnetita)	Complejo Los Colorados Planta de Pellet	Romeral	Otras Menores
Pellet RD			X		
Pellet Básico			X		

Pellet Feed	X	X	X	X	
Granzas			X	X	X
Finos			X	X	X

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la figura 1.3 muestra un resumen de los productos comercializados por CAP Minería.

Figura N°1.3: Productos comercializados.



Fuente: www.cap.cl.

Región de Atacama

El yacimiento más joven de CAP MINERIA Mina Cerro Negro Norte se encuentra ubicada en la región de Atacama, a 32 kilómetros en línea recta al norte de Copiapó y a 42 kilómetros al este de Caldera. La faena está compuesta por un complejo mina-planta en el cual se realiza la explotación del mineral a cielo abierto y el procesamiento.

La producción actual es de 4 millones de toneladas anual de Pellet Feed (concentrado de Hierro) que es transportado en forma de pulpa a través de un concentrado de 82 kilómetros de longitud hasta las instalaciones de Puerto Punta Totoralillo, donde se realiza el embarque hacia su destino final.

Las operaciones unitarias de la mina son:

- Perforación

- Tronadura
- Carguío
- Transporte y desarrollo.

La mina se encuentra actualmente en dos fases de explotación: fase 1 y fase 2, subdividida en dos, fase 1C y fase 1N, con cuatro botaderos en desarrollo para vaciado de materiales estériles: botadero norte, botadero noreste, botadero sureste y botadero sur, más dos acopios de minerales de baja ley.

1.6.5. Destino de los Productos

El embarque se realiza a través de puertos de propiedad de CAP localizados en la Región de Atacama (Punta Totalillo y Huasco) y Región de Coquimbo (Guayacán).

Los productos elaborados por CAP Minería, va mayoritariamente con destino a Asia.

A continuación, en la tabla 1.2 muestra la proporción de embarques con el respectivo país de destino para los últimos 4 años.

Tabla N°1.2: Proporción de embarques CAP.

Participación de Mercado por Destino (%)				
País/Año	2017	2018	2019	2020
China	45	62	62	69
Japón	15	9	11	13
Corea	1	2	2	1
Indonesia	10	4	10	5
Malasia	5	13	3	0
EEUU	2	2	2	2
Chile	20	8	10	10
Perú	2	0	0	0

Fuente: www.cap.cl.

1.6.6. Situación del Mercado

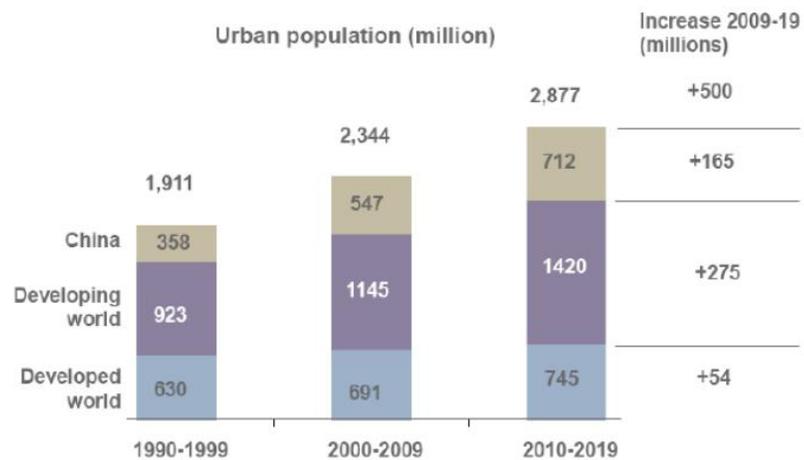
Desde los primeros años de la década del 2000, Asia comenzó a mostrar un creciente nivel de consumo de acero, especialmente China, originado fundamentalmente por el fuerte incremento de la población, la emigración de la población del campo a la ciudad que originó una fuerte etapa de industrialización a través de la generación explosiva de

empresas, que aprovechaban los bajos costos de mano de obra, y generación de infraestructura de construcción que permita satisfacer las necesidades de crecimiento.

Es así como Asia y en particular China, se transforma en el motor del crecimiento mundial demandando altas cantidades de materia prima. La figura 1.4, muestra el crecimiento de la población urbana en el período 1990 a 2009 y la proyección al 2019.

Se aprecia que mientras el crecimiento de la población en los países desarrollados crece a tasas relativamente discretas, la población de los países emergentes y en particular del país China es muy elevada. En particular, se espera sólo que China entre los años 2009 al 2020, incremente su población en 165 Millones de habitantes.

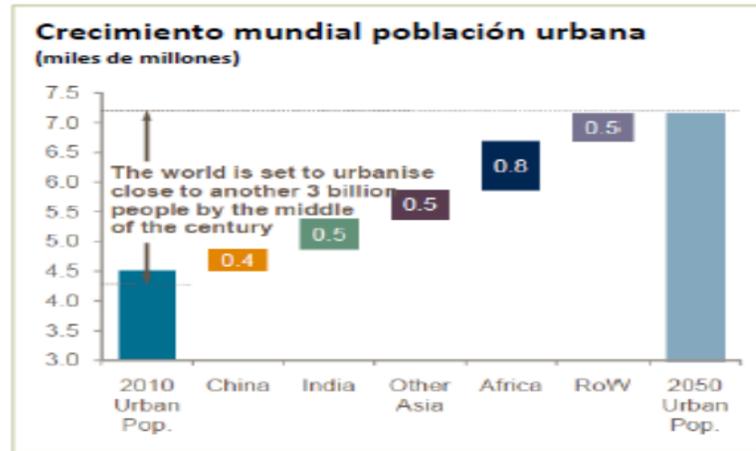
Figura N°1.4: Crecimiento población urbana.



Fuente: Arcelor Mittal, Metal Bulletin.

A nivel global, se espera que para mediados de siglo la población haya aumentado del orden de 3 billones de personas distribuidas principalmente en China, India, Otros de Asia y África.

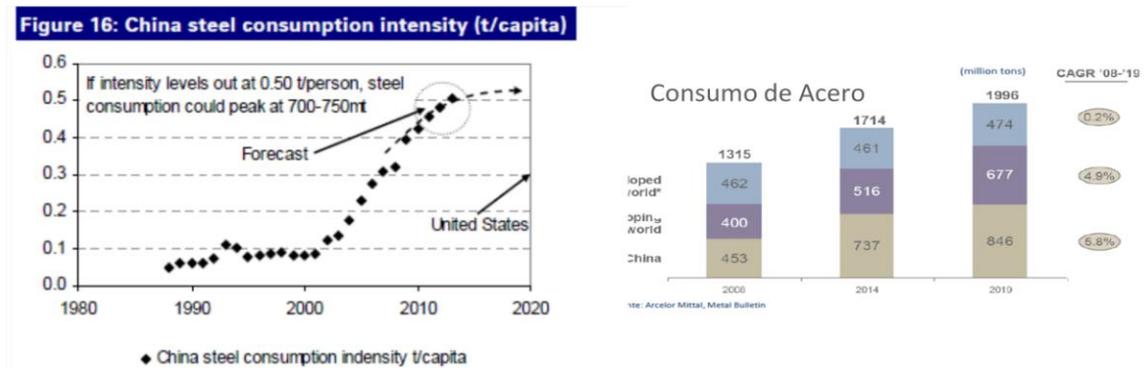
Figura N°1.5: Crecimiento mundial población urbana.



Fuente: Source UN. McKinsey. Río Tinto.

Acorde con el crecimiento de población se proyecta altos consumos de acero. La figura 1.6, muestra el crecimiento del consumo de acero en la década del 2000 y proyecciones de consumo para los años 2014 y 2019.

Figura N°1.6: Crecimiento del consumo de acero.

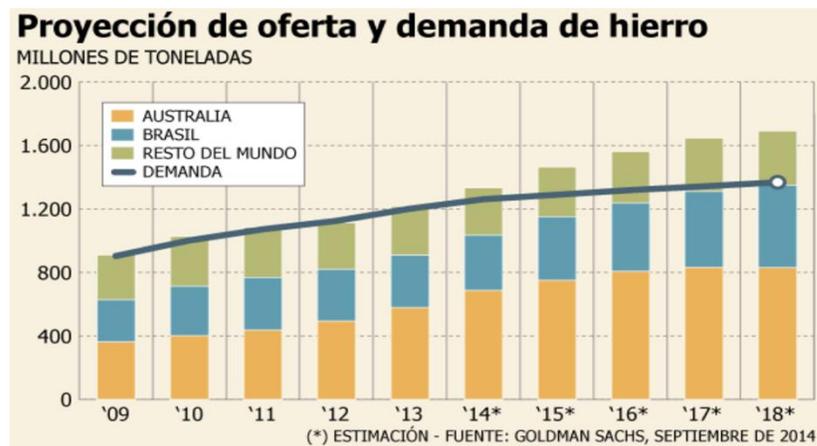


Fuente : www.cap.cl.

Esta creciente demanda originada en la década del 2000, sumadas a las proyecciones de consumo, especialmente de los países emergentes y en particular China, ha generado un alza en los precios de todos los commodities, motivando a los productores de acero (que son los consumidores de minerales de hierro) a inclinarse por consumir los productos de menor precio en el mercado como son las granzas, los finos y los pellets feed.

El gráfico 1.1 muestra la tendencia creciente de la proyección de oferta y demanda de hierro. Período 2009-2018.

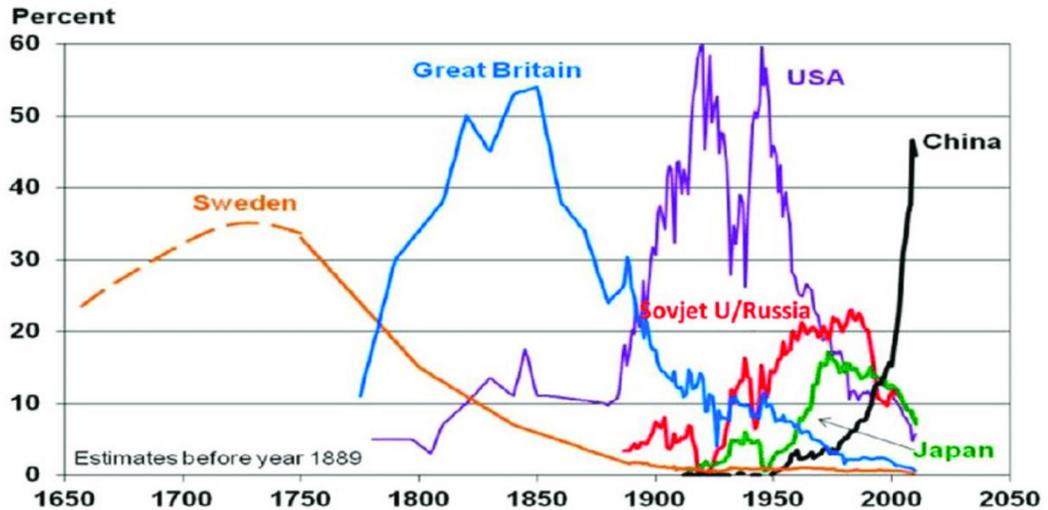
Gráfico N°1.1: Oferta y demanda de hierro.



Fuente: <http://miningpress.com/nota/272772/cap-reduccion-de-costos-y-de-produccion-suma-a-terceros-en-nuevos-proyectos>.

Esto se ve refrendado en el hecho que se espera que China llegue a un estándar de consumo de país desarrollado, tendencia que se da durante esta década en que está llegando a niveles de consumo de países como Francia o Alemania.

Gráfico N°1.2: Tendencias consumo países.



Fuente: World Steel Production, historical data from.

Este incremento en la demanda de los productos de menor costo, pellets feed ha generado una brecha que los productores ven como una posibilidad de crecimiento.

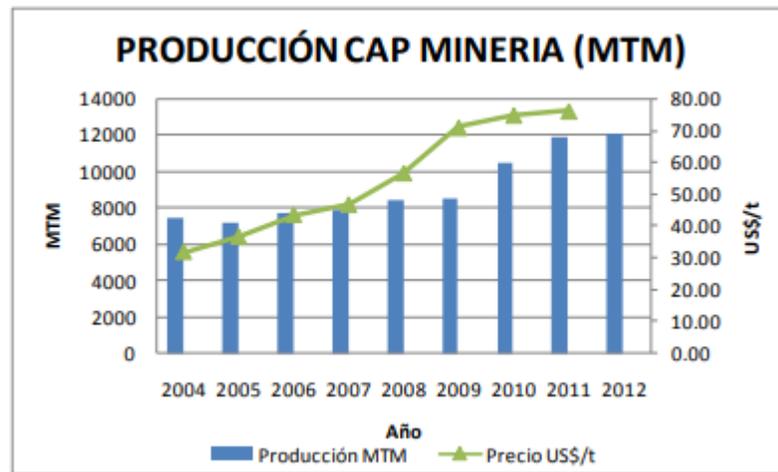
1.7. Plan de Crecimiento CAP Minería

1.7.1. Operaciones

CAP Minería no se queda atrás y ya desde el año 2005 entra en una etapa de expansión de sus operaciones de tal forma de capturar parte del nicho de mercado generado. En línea con el aumento de precios que tienen los commodities en los últimos años, motivado por el incremento del consumo externo, CAP Minería muestra un incremento sistemático de producción desde el 2005 en adelante.

El gráfico 1.3, muestra el perfil de precios y los niveles de producción de CAP Minería entre los años 2005 y 2012.

Gráfico N°1.3: Producción CAP Minería



Fuente: Elaboración propia.

El aumento de precios y el agotamiento de recursos de minas en operación como Romeral y Algarrobo, ha motivado el estudio de nuevos proyectos que sirvan como proyectos estructurales de reemplazo y el aumento de producción aprovechando la buena perspectiva de precios que se tiene. De esta forma CAP Minería tiene un agresivo Plan de Desarrollo, con el estudio de varios proyectos, entre los más importantes se cuenta:

Proyecto Hierro Atacama (planta magnetita)

En 2008 se inaugura Minera Hierro Atacama (planta magnetita), destinada a procesar los relaves de Candelaria con un nivel de producción de 3,0 Mt/año de Pellet Feed.

Proyecto Ampliación Los Colorados

El año 2008, se planifica una expansión del complejo Los Colorados – Planta de Pellets a fin de aumentar la producción final de 5,2 Mt/año a 7,2 Mt/año con el diferencial producido en Pellet Feed, este proyecto entra en plena producción en el año 2014.

Proyecto Cerro Negro Norte

También el año 2006 comienzan los estudios de viabilidad operacional de Cerro Negro Norte, faena actualmente en etapa de pre-stripping (En minas a cielo/rajo abierto, se realiza un trabajo llamado pre-stripping, que consiste en extraer la roca sin valor comercial (estéril) que está cubriendo las reservas minerales, en palabras más sencillas es la etapa primaria de explotación) Y construcción de planta, que aportará una producción adicional. Este proyecto entra en plena etapa de operación el primer trimestre de 2014.

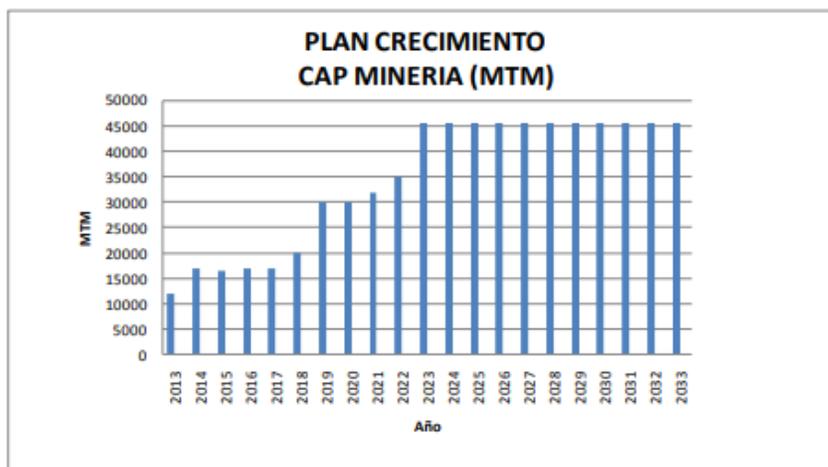
Proyecto Romeral Fase IV

El año 2008 se genera una expansión de Mina El Romeral destinada la producción de 2,3Mt/año de productos entre Granzas, Finos y Pellet Feed.

Proyecto Romeral Fase V

Corresponde a una ampliación del anterior y entra en Plena producción en 2014. El gráfico 1.4, muestra el Plan de Crecimiento de la Compañía para un horizonte de 20 años.

Gráfico N°1.4: Producción CAP Minería



Fuente: Elaboración propia.

El Plan de Crecimiento contempla además la entrada futura de proyectos como Tofo-I, Tofo-II y otros. La tabla N°1.3, muestra el nivel de producción por tipo de proyecto.

Tabla N°1.3: Producción por tipo de proyecto.

Faena	Producción parcial (kt)	Producción Final	Producción Acumulada (kt)	Año Inicio Operación
Los Colorados Proyecto Base	5.800	4.640	4.640	1998
Los Colorados Ampliación -1	700	560	5.200	2006
Romeral Fase IV	2.300		7.500	2009
Hierro Atacama	3.000		10.500	2008
Enlace	1.100		11.600	2007
Los Colorados Ampliación -2	2.650	2.120	13.720	2014
Romeral Fase V	1.600		13.020	2014
Cerro Negro Norte	4.000		17.020	2014
Tofo-1	13.500		30.520	2018
Tofo-2	15.500		46.020	2022

Fuente: Elaboración propia.

Este plan agresivo de crecimiento y en línea con la visión de la empresa permite a CAP Minería estar entre los 10 primeros productores de Fierro a nivel Mundial.

1.7.2. Bases que Sustentan Plan de Crecimiento

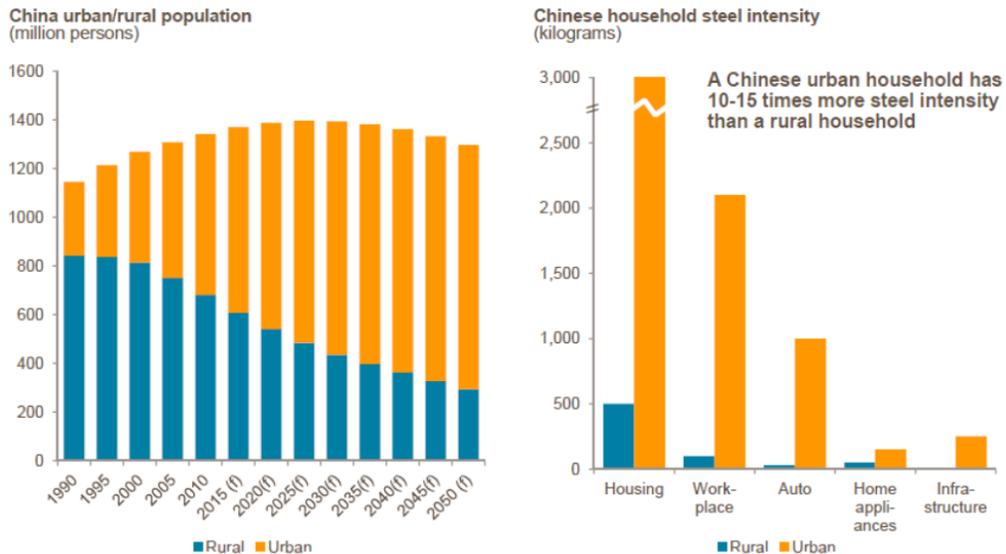
Las bases que sustentan el Plan, tienen relación con la situación esperada del mercado, los recursos con los que cuenta la Compañía, la situación financiera que permita disponer los recursos monetarios y el recurso humano requerido para poner en operaciones los proyectos en estudio.

1.7.2.1. Mercado

A mediados de la década pasada, se inicia un fuerte proceso de industrialización de los mercados asiáticos emergentes con gran densidad de población, generando una importante migración de un 18% de personas del campo a la ciudad en busca de mejores oportunidades de empleo y condiciones económicas.

Este crecimiento explosivo de la población urbana en los países en vías de desarrollo, especialmente China, ha motivado un aumento en el consumo de materias primas para satisfacer la construcción de industrias, edificios, casas, y en general producción de bienes con contenido de acero. El gráfico 1.5 muestra el crecimiento de la población urbana versus la rural del país China donde se observa que es mayor.

Gráfico N°1.5: Crecimiento de la población urbana y rural de China.

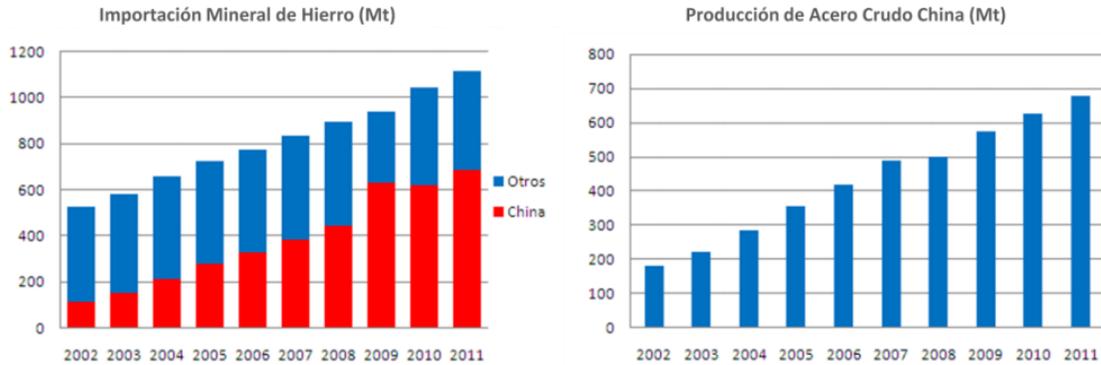


Fuente: www.eluniverso.com.

Se ha generado de esta forma, una creciente demanda por concentrados de hierro, impactando en forma positiva el precio del mineral. Diversos estudios sobre la demanda de hierro a nivel mundial, indican que esta fuerte demanda de los mercados asiáticos se mantendrá en los próximos 20 años [2].

Por otra parte, el gráfico 1.6 muestra el nivel de importación de hierro y producción de acero de China en miles de toneladas (MT).

Gráfico N°1.6: Importación mineral hierro y producción.

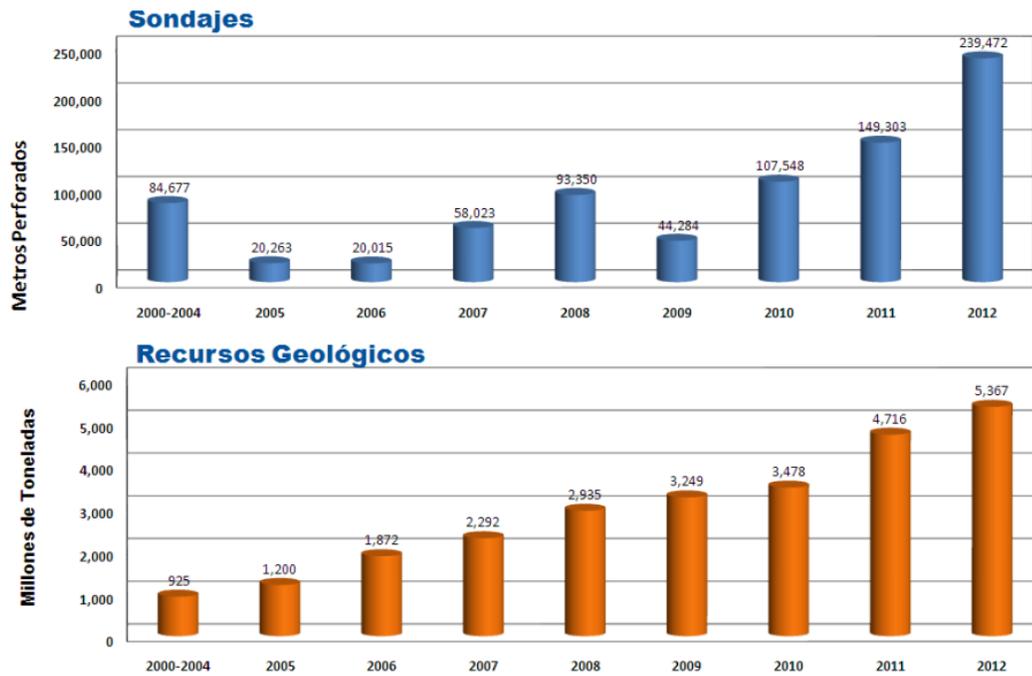


Fuente: www.eluniverso.com.

1.7.2.2. Recursos Mineros

La base más importante de crecimiento para una compañía minera la constituye el recurso minero, al respecto CAP Minería desde mediados de la década pasada comenzó con una fuerte campaña de búsqueda de nuevos recursos. Esto se ve reflejado a través del fuerte incremento de metros de sondajes perforados y que ha permitido un interesante nivel de crecimiento de recursos.

Gráfico N°1.7: Nivel de Sondajes.



Fuente: www.cap.cl.

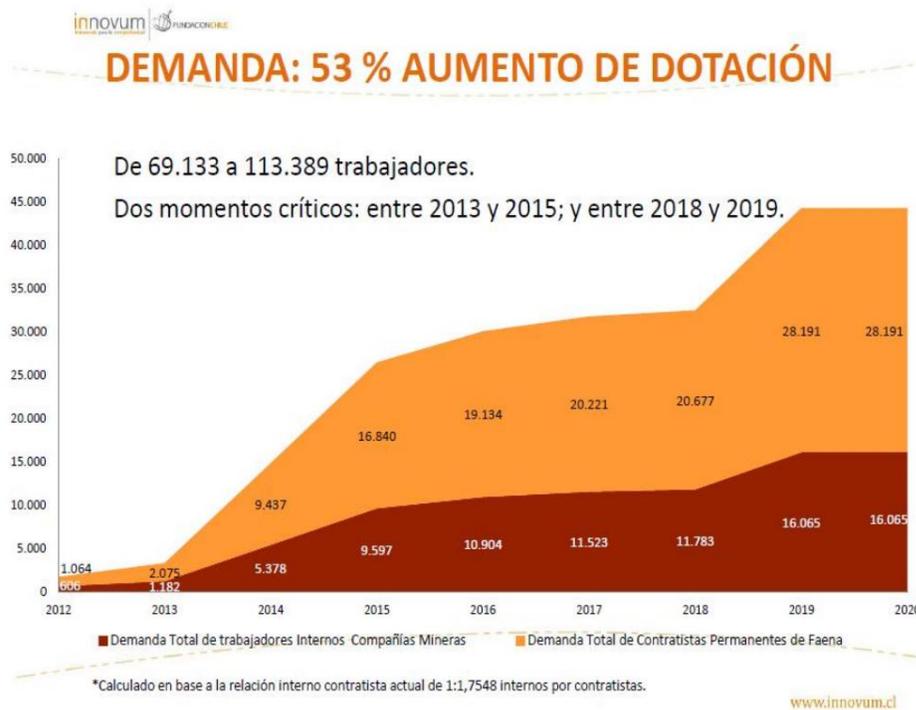
1.7.2.3. Situación Financiera CAP Minería

La situación financiera de CAP está en muy buen pie. En el ejercicio del año 2012, CAP se caracterizó por mantener una alta liquidez, apoyada fundamentalmente por el elevado precio de los minerales de hierro. Esta mayor liquidez, reflejada en una caja consolidada de 711 MUS\$ y un reducido endeudamiento financiero bruto de MUS\$ 718.685, le permitió mantener un endeudamiento neto de solo 7 MUS\$, la materialización de las inversiones en minería principalmente a través de recursos propios. Esta buena situación permitió materializar los proyectos en aumento de producción tales como: Valle del Huasco y Cerro negro Norte que permitirán incrementos de producción de 2,1 Mt/año y 4,0 Mt/año de productos finales, incrementando la producción de la compañía a partir de 2014 en un equivalente del orden de 50% de la producción del año 2012. Por otra parte, esta sólida posición financiera le permite contar con el respaldo adecuado para solicitar los préstamos necesarios a la banca.

1.7.2.4. Recurso Humano

Uno de los pilares más relevantes para asegurar el Plan de Crecimiento de la Compañía es el Recurso Humano, tema en el cual CAP Minería debe poner especial atención a fin de adquirir las habilidades requeridas adecuadas para asegurar un desempeño superior. Existe una serie de trabajos desarrollados en los últimos tiempos que indican un crecimiento explosivo del requerimiento de mano de obra en las actividades mineras. La figura 1.7, corresponde a un estudio desarrollado por la Fundación Chile que muestra que al año 2020 se requiere incorporar del orden de 16 mil trabajadores propios y 28 mil trabajadores de empresas de servicios, llegando a totalizar, el año 2020, del orden de 110 mil trabajadores ligados a la actividad minera [4].

Figura N°1.7: Dotación RRHH.



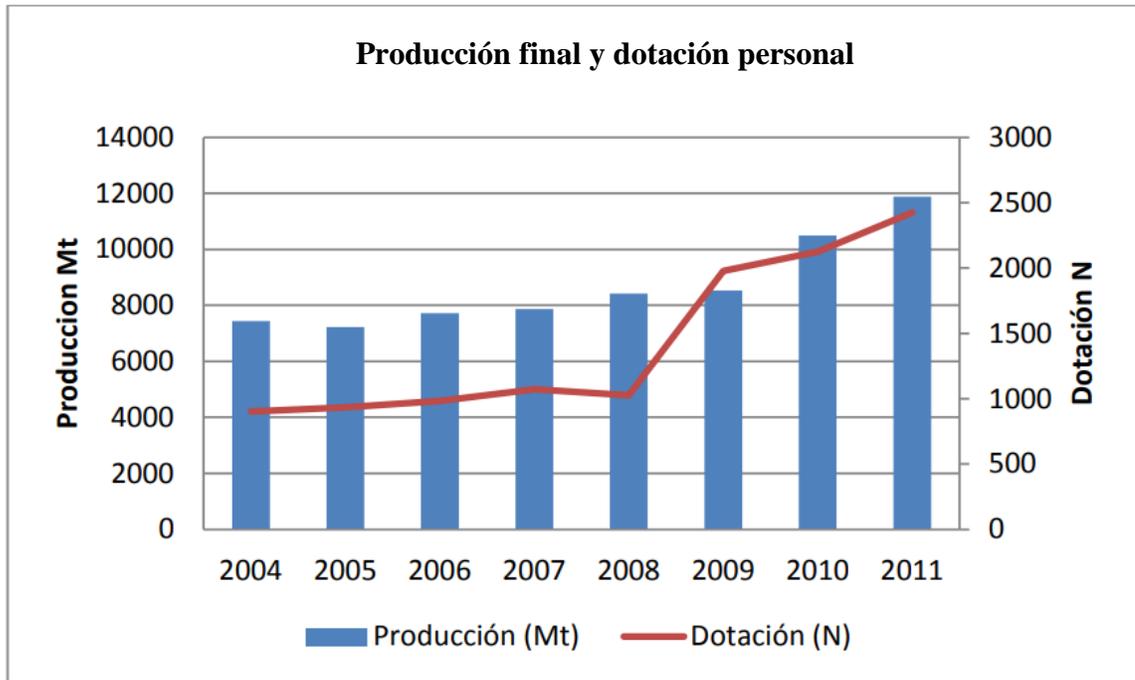
Fuente: Fundación Chile.

Esta alta demanda de trabajadores es el objetivo de todas las empresas mineras en procesos de apertura y/o expansión sin considerar aquellos reemplazos que se originen por fuga de especialistas a otras faenas.

CAP Minería no está ajena a esta situación que de hecho ya se comienza a dar desde inicios de la década del 2000 producto del inicio del auge de la actividad minera.

El gráfico 1.8 muestra la dotación histórica de CAP Minería desde el año 2004.

Gráfico N°1.8: Producción versus dotación de personal.

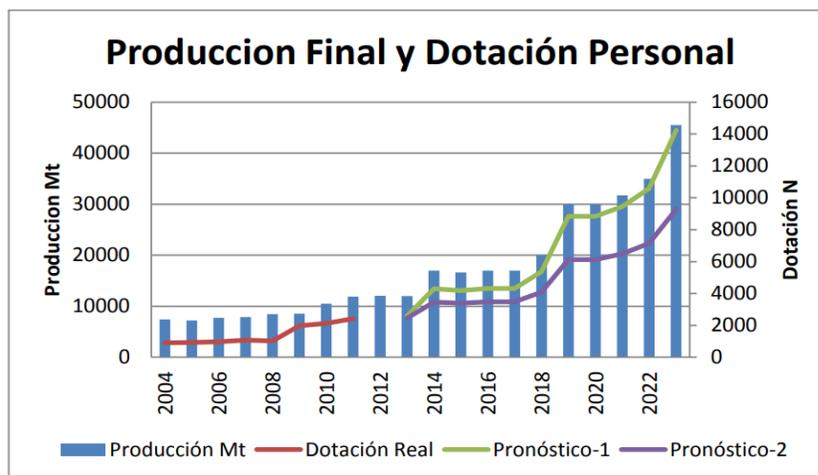


Fuente: www.cap.cl.

Se observa que existe un crecimiento permanente acorde a los ritmos de producción alcanzados.

Considerando el Plan de Crecimiento de la Compañía, se espera un aumento considerable de la dotación de trabajadores. La gráfica 1.9 muestra el crecimiento de la dotación esperada en función del Plan de la Crecimiento de producción planificado por año.

Gráfico N°1.9: Dotación de personal versus crecimiento de producción.



Fuente: www.cap.cl.

Se han establecido dos pronósticos, uno por correlación ($r=0.9$) y otro considerando solo la productividad del año 2011, esto con el objetivo de poder establecer la Dotación (N) Producción (Mt) Producción Final y Dotación Personal Producción (Mt). Dotación N Producción Mt Producción Final y Dotación Personal Producción Mt Dotación Real Pronóstico-1 Pronóstico-2 23 aislar la situación de tecnología menos avanzada en los primeros años de la información analizada (Equipos de menor capacidad, más lentos, menor automatismo, etc.).

La proyección más conservadora establece que se requerirá sobre 6.500 trabajadores adicionales equivalente a un 279% por sobre la dotación actual.

De acuerdo a las cifras indicadas, CAP Minería tiene un desafío importante por delante para asegurar la adquisición de la dotación con las habilidades requeridas y la definición de formas de capacitación que aseguren la fijación de conocimiento que toma gran relevancia en la actualidad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Ingeniería en Mantenimiento

En este capítulo se desarrollara la definición de mantenimiento y los tipos que existen con la finalidad de poder establecer parámetros y análisis de criticidad.

2.1.1. Definición de Mantenimiento

En la actualidad, el sistema de gestión de mantenimiento es un eje primordial en el proceso productivo de una empresa.

La función de mantenimiento es una variable que puede permitir mejorar costos, precios y calidad. Debido a ello, las empresas han ido mejorando progresivamente su sistema de gestión de mantenimiento.

- **La norma Francesa AFNOR NF X 60.010**, define como mantenimiento el “conjunto de acciones que permiten mantener o restablecer un bien a un estado especificado o en capacidad de asegurar un servicio determinado.”
- **La norma militar Americana MIL-STD-721C**, define como mantenimiento a “todas las acciones necesarias para conservar un ítem en un estado especificado o restablecerlo a él”.
- **La Organización Europea del Mantenimiento**, la define como “Función empresarial a la que se encomienda el control constante de las instalaciones. Así, como el conjunto de los trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de las instalaciones productivas, servicios e instrumentación de los establecimientos”.
- **La Sociedad de Ingeniería del Mantenimiento de Australia, MESA**, define la mantención como “Las decisiones de ingeniería y las acciones asociadas necesarias y suficientes para lograr la optimización de una capacidad especificada”.
- **La norma británica BS 381**, define mantención como “La combinación de todas las acciones técnicas y administrativas asociadas tendientes a conservar un ítem o restablecerlo a un estado tal que pueda realizar la función requerida”.

Tomando en cuenta las definiciones precedentes, se puede extraer que, por *mantención*, es el conjunto de actividades necesarias para conservar o restaurar un ítem, en un estado especificado, de tal forma, que pueda asegurar un servicio determinado en las condiciones de fabricación del activo garantizando su funcionamiento, vida útil y bajos costos de *mantención*.

2.1.2. Evolución del Mantenimiento

La *mantención* ha estado presente desde el comienzo de la historia de la humanidad, por cuanto, todo lo que el hombre fabrica tiene que ser mantenido, el objeto fabricado se deteriora por la acción natural del paso del tiempo.

Desde la revolución industrial y hasta 1914 la gestión de *mantención* prácticamente no existía. Cada reparación o ajuste era ejecutado por el mismo personal de operación.

A fines del siglo XIX y en atención a las consecuencias o efectos de la primera guerra mundial en 1914, a los avances tecnológicos, mecánicos y la producción en serie impulsada en gran medida por las fábricas Ford, las industrias tuvieron que adoptar tiempos mínimos de reparación de sus equipos.

Se creó un departamento dentro de la organización empresarial sub-ordinado de operaciones, que se encargaba del cumplimiento de la *mantención* cuando algo dejaba de funcionar. Dicha estrategia es conocida actualmente como “*mantención correctiva*”.

Lo anterior, se mantiene hasta la década de los 30, cuando en función de la segunda guerra mundial la necesidad de aumento y rapidez en la producción, no solo es necesaria la reparación, sino, se inicia un proceso de prevención de fallas de los equipos. Dicha estrategia es conocida actualmente como “*mantención preventiva*”.

En el año 1950, debido a la post-guerra, el avance en la industria electrónica y la aviación comercial; se crea un órgano de asesoramiento de la producción conocida como “*Ingeniería en Mantenimiento*”, disciplina que se encarga de estudiar las causas y defectos de las averías.

Con la masificación de los computadores en el año 1966, y el fortalecimiento de organizaciones nacionales de ingeniería de mantenimiento, la *mantención* evoluciona a la prevención y predicción de fallas de los equipos. Esto último, es conocido actualmente como “*mantenimiento predictivo*”.

A partir de 1980 y hasta la actualidad, con el desarrollo de las computadoras personales a costos reducidos y lenguaje simple, los órganos de mantenimiento pasaron a desarrollar y procesar sus propios programas, eliminando los inconvenientes de la dependencia de disponibilidad humana y de equipos, para atender las prioridades de procesamiento de la información a través de una computadora central, además de las dificultades de comunicación en la transmisión de sus necesidades hacia el analista de sistemas, no siempre familiarizado con el área de mantenimiento.

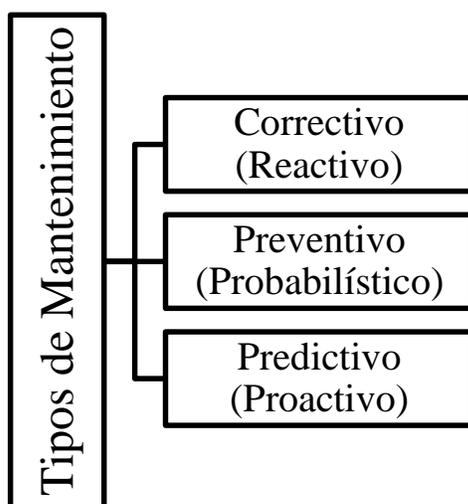
Sin embargo, es recomendable que esas computadoras sean asociadas a una red, posibilitando que su información quede disponible para los demás órganos de la empresa y viceversa. En ciertas empresas esta actividad se volvió tan importante que el PCM - Planificación y Control del Mantenimiento, pasó a convertirse en un órgano de asesoramiento a la supervisión general de producción, ya que influye también en el área de operación.

2.1.3. Tipos de Mantenimiento

Cada negocio en la búsqueda de la excelencia operacional requiere el mejor sistema de gestión de mantenimiento para atender sus necesidades. En lo particular, la empresa analizada, CAP Minería, posee una estrategia de mantención correctiva y mantención preventiva. A modo de progresar en su sistema de gestión en mantenimiento, desea sumar una estrategia de mantención predictiva en sus instalaciones con la intención de mejorar sus procesos productivos y adscribirse adecuadamente a la competencia que presenta el mercado local, nacional e internacional.

A continuación, en la figura 2.1, se describe los tipos de mantenimiento que posee actualmente la minera (mantenimiento correctivo y preventivo) y al que busca implementar (mantenimiento predictivo).

Figura N°2.1: Tipos de Mantenimiento.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.3.1. Mantenimiento Correctivo

Se entiende por mantenimiento correctivo la corrección de las averías o fallas, cuando éstas se presentan. Es la habitual reparación tras una avería que obliga a detener la instalación o máquina afectada por el fallo.

Surge al principio de la revolución industrial hasta el comienzo de la primera guerra mundial, para ser un apoyo a la producción de esa época. Esta parte de la evolución del mantenimiento es conocida como la primera generación del mantenimiento.

En este periodo, las industrias no son complejas ni mecanizadas, los equipos eran mecánicos, sobredimensionados y fáciles de reparar. Debido a ello, los tiempos de detención de la producción no era una prioridad para las operaciones de una organización [4].

Existen dos tipos de mantenimiento correctivos; uno programado y el otro no programado.

- El primero hace referencia a la intervención del equipo cuando se cuenta con el personal adecuado, las herramientas, repuestos y acorde a la necesidad de producción.
- El segundo, es la intervención del equipo cuando la falla se presenta de forma emergente y no da tiempo a la preparación del mantenimiento.

Unos de los principales inconvenientes del mantenimiento correctivo, es la falla de un equipo de alta prioridad, lo cual ocasiona una detención de la producción por largo tiempo, viéndose afectada la línea de producción y objetivos que persigue la empresa.

2.1.3.2. Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo, son todas las actividades programadas que se realizan sobre un ítem cada cierto intervalo de tiempo, sin que esté presente alguna falla o síntoma alguno.

Esta surge entre la segunda guerra mundial y finales de la década de los setenta, debido a que la producción se vuelve mecanizada y los equipos no son fáciles de reparar, y alguna avería ocasiona trastornos dentro del sistema productivo.

Entre las técnicas más utilizadas dentro de un sistema de mantenimiento preventivo está la limpieza, lubricación, sustitución de elementos que están en presencia al desgaste (rodetes, rodamientos, cojinete), verificación de los elementos de un equipo (desmontaje y montaje). El mayor inconveniente del mantenimiento preventivo es desconocer el real estado del equipo antes de intervenirlo, ocasionando gastos excesivos en sustitución de piezas mecánicas, que no necesariamente pueden presentar desgaste, y además, ocasiona detenciones en la línea de producción.

2.1.3.3. Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento que relaciona una variable física con el desgaste o estado de una máquina. Se basa en la medición, seguimiento, monitoreo de parámetros y condiciones operativas de un equipo o instalación. A tal efecto, se definen y gestionan valores de pre-alarma y de actuación de todos aquellos parámetros que se consideran necesario medir y gestionar. Se indaga más en el mantenimiento predictivo y sus técnicas en el punto siguiente.

2.1.3.4. Criticidad de los Equipos

La gestión en el interior de un departamento de mantenimiento es buscar el equilibrio entre las tres principales técnicas de mantenimiento mencionado anteriormente.

Lo antes mencionado se logra con el concepto de criticidad de equipo, que consiste en dar un grado de importancia y respuesta a cada activo en el interior de la planta, resumiendo, se puede clasificar en tres grandes grupos los cuales son:

- **Equipos de criticidad 1 (clase A):** Son los equipos que no pueden fallar ya que paralizan y que además pueden ocasionar algún daño al proceso productivo, personal o algún activo físico.
- **Equipos de criticidad 2 (clase B):** Son equipos que participan del proceso productivo, pero su falla por algún tiempo no interrumpe la producción.
- **Equipos de Criticidad 3 (clase C):** El resto de los equipos que no interfiere en la producción.

En los equipos de criticidad 1 y 2 se debe usar una estrategia de mantenimiento predictivo o preventivo, o una combinación de ambos según se estime y al resto de equipos de criticidad 3 una estrategia de mantenimiento correctivo.

Para lograr identificar a que grupo de equipos críticos corresponde cada activo es necesario utilizar matrices de criticidad que pueden ser de tipo cualitativa o cuantitativa que facilitan la identificación. En la tabla 2.1 se da una matriz con diferentes ponderaciones.

Tabla N°2.1: Matriz con ponderaciones.

N°	Variable	Concepto	Ponderación
1	Producción	Para	4
		Reduce	2
		No para	0
2	Valor-Técnico-Económico	Alto	4
		Medio	2
		Bajo	1
3	Daños Consecuencias	Concepto	Ponderación
	a. La maquinaria (activos)	si	2
		no	0
	b. Al proceso.	si	3
		no	0
	c. Al personal operador.	Riesgo	1
Sin riesgo		0	
4	Dependencia Logística	extranjero	2
		local	0

5	Dependencia mano de Obra	Tercero	2
		Propia	0
6	Facilidad de reparación	Alta	1
		Baja	0
7	Flexibilidad	Simple	2
		By-pass	1
		Dual	0

Fuente: Elaboración propia.

El uso de la matriz de la tabla N°2.1, entrega un valor total que es la suma de las ponderaciones de cada variable. El valor total va del 0 hasta el 21, y según sea el valor total se clasifican en los tres grupos de equipos críticos. Desde 0 hasta el 6 equipo de criticidad 1. Desde 7 hasta el 13 equipo de criticidad 2. Desde 14 hasta el 21 equipo de criticidad 3.

2.5. Mantenimiento Predictivo

2.5.1. Características del Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo, surge en la década de los sesenta debido a la evolución de la industria electrónica y aviación comercial. En la industria electrónica se desarrollan y progresan los instrumentos de medición de variables físicas para los equipos, y en la industria de la aviación surge la necesidad de predecir fallas ya que pueden causar consecuencias irreparables en el bienestar de las personas, por esta razón adoptan este tipo de estrategia de mantenimiento [4].

El mantenimiento predictivo se basa en que la mayoría de las partes de un equipo entrega un aviso antes de fallar. Estos síntomas serán percibidos por una serie de pruebas según corresponda; tales pueden ser análisis de aceite, análisis de vibraciones; y medición de temperaturas. El uso correcto de cualquiera de estas técnicas permite un mantenimiento más eficiente en comparación del mantenimiento correctivo y preventivo.

2.5.2. Implementación del Mantenimiento Predictivo

La preparación de un plan de mantenimiento predictivo requiere una serie de pasos a seguir:

- **Inventario de equipos:** Consiste en la elaboración de un listado de máquinas con su respectiva codificación dentro del proceso productivo, que van a incluirse en el programa de mantenimiento predictivo. En los inicios del plan de implantación del sistema predictivo, es muy conveniente tener bajo control a un pequeño grupo de los equipos más críticos, e ir trabajando sobre ellos hasta consolidar las técnicas aplicadas. Luego el programa se extiende progresivamente al resto de equipos.
- **Parámetros a monitorear:** Consiste en la selección de los puntos y técnicas de monitoreo predictiva que se usa en cada equipo crítico seleccionado. Por último, se deben definir los límites de condición aceptables, estos pueden ser dados por normas, por el fabricante del equipo, o por la experiencia o evaluación de tendencias. Si estos están muy bajos, pueden existir muchas falsas alarmas. Si los límites de alarma están muy sobredimensionados, muchas averías pueden desapercibidas.
- **Adquisición de datos:** Estos deben garantizar que los datos sean de la mayor calidad posible. La selección del sensor de vibración debe ser la correcta para cada equipo. El más usado por su fiabilidad es el acelerómetro, y la cámara termografía debe ser la idónea con una buena resolución en su medición.
- **Software de análisis:** Es conveniente generar informes de cada máquina. Los programas informáticos especializados ayudan a reducir el tiempo necesario para emitir un diagnóstico, lo que hace del computador y software una herramienta imprescindible.
- **Estado del equipo:** Tras el informe se debe desarrollar una descripción de los problemas de cada equipo, esto depende exclusivamente de la técnica de monitoreo. En vibraciones, el análisis global solo discriminara el estado de la vibración (bueno, regular y malo) y es el análisis frecuencia el que determinara el o los problemas predominantes.
- **Toma de decisión:** La toma de decisiones oportuna marca la gran diferencia que hay entre: que una avería progrese, su reparación sea costosa y se convierta en un riesgo para la operación del equipo o proceso, o que se actúe con rapidez, para evitar que la avería o averías avancen y se logre ahorrar grandes cantidades de recursos, tanto económicos y materiales como humanos.

- **Orden de trabajo:** Se emite una orden de trabajo en la que conviene especificar el nombre del equipo, y la intervención que se debe realizar, así como un código de prioridad de la intervención.
- **Retroalimentación del sistema:** Consiste en comprobar el estado de los elementos o partes del equipo sustituidas y hacer una medición posterior a la reparación.

2.5.3. Técnicas de Mantenimiento Predictivo

A continuación, se describen brevemente las principales técnicas utilizadas en mantenimiento predictivo, se trata más extensamente las vibraciones y termografía en los puntos posteriores:

- **Inspecciones boroscópicas.** Son inspecciones visuales en lugares inaccesibles para el ojo humano con la ayuda de un equipo óptico.
- **Líquidos penetrantes.** Se trata de una inspección no destructiva que se usa para encontrar fisuras superficiales o fallos internos del material que presentan alguna apertura en la superficie.
- **Ultrasonido.** Se basa en el análisis de las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por las máquinas cuando presentan algún tipo de problema.
- **Análisis de Aceite.** Determina el estado operacional del equipo a partir del estudio de las propiedades físicas y químicas de su aceite lubricante. El aceite es muy importante en las máquinas porque sirve para proteger del desgaste, controla su temperatura y elimina sus impurezas. Cuando el aceite presenta altos grados de contaminación y/o degradación, no cumple con estas funciones y la máquina comienza a fallar.
- **Termografía.** Estudia el comportamiento de la temperatura de las máquinas con el fin de determinar si se encuentran funcionando de manera correcta.
- **Vibraciones.** Se basa en el estudio del funcionamiento de las máquinas rotativas a través del comportamiento de sus vibraciones.

2.5.4. Ventajas del Mantenimiento Predictivo

Se planifica la reparación de algún equipo en la fecha donde se cuente con el personal más idóneo, los materiales, y en función del proceso productivo; generalmente que coincidan con paros programados de la planta.

Disminuye el riesgo que puede ocasionar a la infraestructura, al medio ambiente y personas por una falla forzada.

Aprovecha al máximo la vida útil de los elementos que componen un equipo antes de repararlo o sustituirlo, mejorando los costos de mantención.

Incrementos de productividad del 2% al 10% [5].

2.5.5. Desventajas del Mantenimiento Predictivo

Se requiere de instrumentación de medición para desarrollar las inspecciones de los equipos. Estos instrumentos suelen ser de alto costo, por lo que se necesita buscarse las mejores opciones para adquirirlos.

El personal encargado de las inspecciones y análisis predictivo debe ser altamente calificado, lo que eleva, consecuentemente su costo.

2.6. Mantenimiento Predictivo por Vibraciones

2.6.1. Definición de Vibración

Según lo establecido en la norma ISO 2041 “vibración es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio de referencia”.

2.6.2. Características de las Vibraciones

Para caracterizar la vibración hay que estudiar una onda. Una onda es la propagación de una perturbación que transfiere energía progresivamente de un punto a otro, a través de un medio y que puede tener la forma de una deformación elástica, variación de presión, intensidad magnética, eléctrica o de temperatura. Las ondas se pueden clasificar según si necesitan un medio elástico (aire, agua, sólido) para propagarse, o si no necesitan de éste.

Las primeras son llamadas ondas electromagnéticas y las segundas ondas mecánicas sea esta mecánica o electromagnética son:

- **Cresta:** Es el punto más alto de dicha amplitud o el punto máximo de saturación de la onda.
- **Período:** Es el tiempo que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.
- **Frecuencia:** Es el número de veces que se repite dicha vibración (oscilación) en un intervalo de tiempo.
- **Valle:** Es el punto más bajo de una onda.
- **Longitud de onda:** Es la distancia entre dos puntos de igual estado vibratorio.

2.6.3. Parámetros en la Medición de la Vibración en Equipos Rotativos

Todo equipo rotativo vibra, esta vibración entrega propiedades físicas que son medibles como el desplazamiento, velocidad y aceleración.

- **Desplazamiento:** Es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia. Es conveniente medir este parámetro cuando se sospecha que los posibles fallos se reflejen en la zona de bajas frecuencias, se mide generalmente en milésimas de metro.
- **Velocidad:** Es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo. Permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas y de otros componentes cuando están en un estado evidente de desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, entre otros. Este parámetro es importante para resaltar picos de bajas y medias frecuencias por estas razones es el más utilizado en mediciones. Se mide habitualmente en milésimas de metros por segundos.
- **Aceleración:** Es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo. La medida de la aceleración se utiliza cuando existen fuerzas importantes que se producen a altas frecuencias. Se mide en G que significa la aceleración de gravedad ($9,86 \text{ m/s}^2$).

2.6.4. Medida Global de la Vibración

La forma más elemental y la primera para el análisis de vibraciones, se llama medida global de la vibración. Esta lectura nos suministra una magnitud, que representa la cantidad de energía vibratoria total contenida en una onda emitida por máquina.

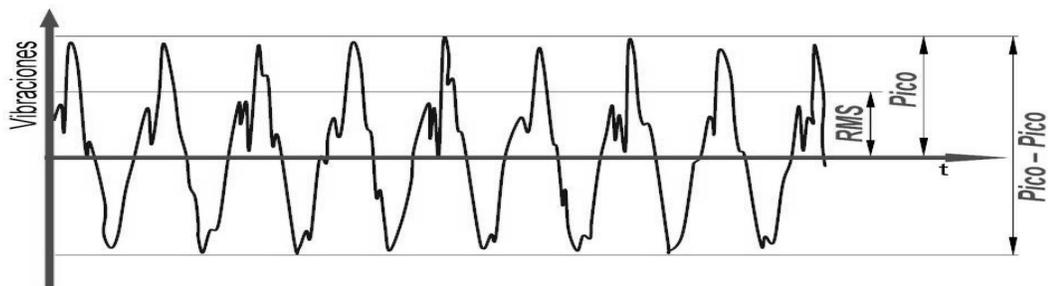
La idea que transmite este análisis, es que un mayor nivel de vibración nos puede indicar un serio problema, el cual debe ser examinado en más detalle por otro tipo de análisis que puntualiza la falla. Hay tres magnitudes para caracterizar la vibración global de la vibración.

El valor PICO (ISO 2041), es el máximo valor alcanzado por la vibración durante un intervalo de tiempo.

El valor PICO-PICO (ISO 2041), es la diferencia algebraica entre los valores extremos de una magnitud que varía durante cierto intervalo de tiempo.

El valor RMS (ISO 2041) es el valor medio de los valores instantáneos al cuadrado, que estima la energía de la vibración en un período de tiempo. Por otra parte el valor pico ni el pico estima el historial de la onda vibratoria y por lo tanto es el valor RMS que estima de mejor manera la severidad vibratoria de acuerdo a lo que se observa en la figura 2.2.

Figura N°2.2: Magnitudes globales de la vibración.



Fuente: www.mantenimiento.cl.

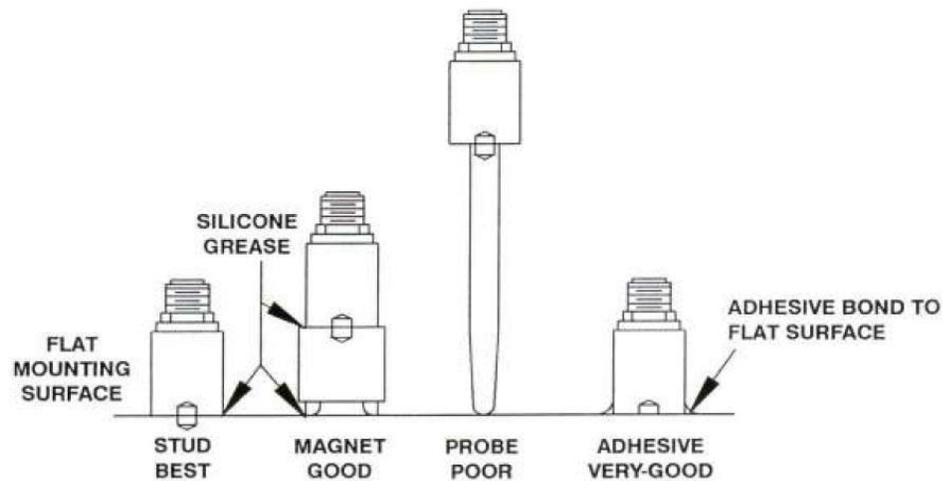
2.6.5. Etapas de la Medición

En general hay cuatro etapas en la cadena de medición, estas son:

Etapla traductora: Es el primer eslabón de la medición, aquí la vibración mecánica (desplazamiento, velocidad, aceleración) es transformada en una señal eléctrica gracias a un traductor o sensor. El traductor o sensor puede ser de cuatro tipos de desplazamiento relativo sin contacto, de desplazamiento relativo con contacto, de velocidad o velocímetro y de aceleración o acelerómetro.

A cada sensor se le pueden acoplar distintos montajes para desarrollar las mediciones en la máquina. La figura 2.3 muestra los más comunes, entre ellos, el más utilizado es de unión magnética por lo estable de su medición y que no necesita intervenir la superficie de la máquina para desarrollar la medición.

Figura N°2.3: Montajes más comunes.



Fuente: www.mantenimiento.com.

Etapa de acondicionamiento: Algunos sensores no pueden entregar directamente sus valores a un analizador de vibraciones, es por esta razón que tienen que ser acondicionadas con algún amplificador de señal.

Etapa de procesamiento: Es aquí donde se mide la vibración como el valor global en RMS, analiza su forma de onda en el dominio del tiempo entre otros datos.

Etapa de registro: De la etapa anterior hay que dejar un registro, este puede ser mediante computador, hoja de trabajo o plotter donde se pueda acceder de forma fácil.

2.6.6. Norma ISO 2372

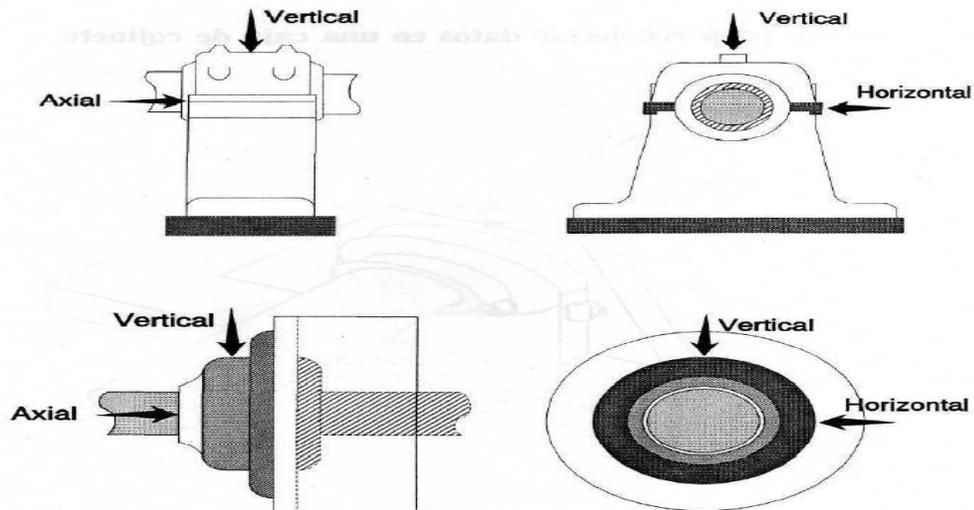
ISO 2372 Vibraciones mecánicas que opera con velocidades entre 10 y 200 (rps). Es una pauta para comenzar un acercamiento a lo que representa una condición normal de la máquina, la cual especifica diferentes límites de la severidad vibratoria de esta última.

Estos indicadores contemplan la medición del nivel total de velocidad RMS dentro de un rango de frecuencias de entre 10 Hz y 1000 Hz. Para el uso de este estándar hay que tener en cuenta algunos aspectos:

Equipos utilizados en la medición, debe entregar un valor global en RMS en un rango de frecuencia de 10 a 1000 Hz. Además, debe de soportar las condiciones operacionales de la máquina.

Puntos de medición: La medición se debe hacer sobre los descansos de cada máquina en tres direcciones (horizontal, vertical y axial) como se muestra en la figura 2.4.

Figura N°2.4: Montajes más comunes.



Fuente: www.mantenimiento.com.

Condiciones operacionales de la máquina: Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos hayan alcanzado sus condiciones de trabajo nominal.

La evaluación de la severidad de la vibración basándose en la experiencia entre frecuencias de 10 Hz a 1000 Hz.

La norma establece que hay un cambio en la condición de la maquina cuando haya ocurrido una diferencia de la vibración global en una razón de 1:1.6.

La norma ISO 2372 además establece una tabla de diagnóstico para la severidad vibratoria, la cual dependiendo de la característica de la máquina, indica la calidad de la vibración de la forma siguiente.

Tabla N°2.1: Matriz con ponderaciones.

Rango de clasificación	Rango de velocidad efectiva RMS (mm/s)	Tipo de Máquinas			
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
0.28	0.18 a 0.28				
0.45	0.28 a 0.45	A			
			A		
0.71	0.45 a 0.71			A	
					A
1.12	0.71 a 1.12				
		B			
1.8	1.12 a 1.8				
			B		
2.8	1.8 a 2.8				
		C		B	
4.5	2.8 a 4.5				
			C		B
7.1	4.5 a 7.1				
				C	
11.2	7.1 a 11.2				
		D			C
18	11.2 a 18		D		
				D	

28	18 a 28				D
----	---------	--	--	--	----------

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de máquina:

- **Clase 1:** Máquinas pequeñas bajo 15 Kw.
- **Clase 2:** Máquinas de tamaño mediano de 15 a 75Kw, o máquinas rígidamente montada hasta 300 KW.
- **Clase 3:** Máquinas grandes sobre 300 Kw. Montada en soportes rígid.
- **Clase 4:** Máquinas grandes sobre 300 Kw. Montadas en soportes flexibles.

Calidad de la vibración:

A: Buena. **B:** Satisfactoria. **C:** Insatisfactoria. **D:** Inaceptable.

Para evaluar la severidad de las máquinas, de todos los puntos medidos se toma el con mayor valor global RMS, y se entra en la tabla por clase de máquina y se ve la calidad de la vibración.

2.6.7. Período de Inspección en Vibraciones

El periodo de monitoreo que se debe realizar a un equipo, depende de sus horas de operación, de su historial de operación y las condiciones de diseño presentadas por el fabricante. Los criterios en los que se basa el establecimiento de periodos de monitoreo son los siguientes:

- **Monitoreo semanal o quincenal:** Equipos con criticidad uno que están sometidos a condiciones de operación extensas, o falta de información en su historial de operación.
- **Monitoreo Mensual:** Máquinas con criticidad dos.
- **Monitoreo Anual:** Todos los equipos con criticidad tres, o para los que su fabricante garantiza larga vida.

Es importante mencionar que toda máquina a medida que se incrementen sus horas de operación, es necesario reducir los intervalos de monitoreo hasta su reparación, evitando con esto la falla en el equipo.

2.6.8. Severidad Vibratoria

Para cada equipo hay que definir qué tan severa es la vibración, para esto hay varios métodos de evaluación.

- **Límites por normas:** Existen normas que hacen referencia a la severidad vibratoria, en la que se puede apoyar al comienzo de una estrategia predictiva la ISO 2372 o su homóloga actual ISO 10816-3. La norma indica que cada vez que hay un cambio de un 60 % sucede un cambio en el nivel vibratorio, y un cambio en la condición del equipo cuando aumenta en un 2.5 veces su valor global.
- **Límites dados por el fabricante:** Otra fuente de información sobre los límites de vibración es la dada por los fabricantes de los equipos, si está disponible esta información, es valiosa la comparación entre los valores medidos y los entregados por los fabricantes.
- **Límite dado por tendencia y experiencia:** El mejor indicador de todos es la experiencia que hay sobre los equipos, para ellos llevar los registros de los valores globales es elemental para fijar los límite.

2.7. Termografía

2.7.1. Definición de Termografía

Es una tecnología para efectuar inspecciones no destructivas (inspección a distancia sin intervenir el objeto a ser controlado), de equipos mecánicos, eléctricos, auditorías térmicas de edificios, inspección de losas en edificios y muchas otras aplicaciones. Esta tecnología, por medio de una cámara de termografía, permite captar los rayos infrarrojos que todo cuerpo emite para así medir y analizar si las temperaturas detectadas son normales o indicativas de posibles problemas que no son visibles al ojo humano [6].

2.7.2. Métodos de Transferencia de Calor

Conducción: Es el paso de la energía calorífica a las moléculas adyacentes mediante la transferencia de energía vibratoria o el movimiento de los electrones libres sin que se aprecie un movimiento observable de partículas.

Convección: Es la transferencia de calor desde un punto a otro dentro de un fluido por la mezcla de una porción de fluido con otra. En la convección natural, el movimiento es provocado por gradientes de densidad, causados por la temperatura y la gravedad. En la convección forzada el movimiento es producido por medios mecánicos.

Radiación: Es la transmisión de calor mediante ondas electromagnéticas.

2.7.3. Espectro Electromagnético

Una onda electromagnética es la propagación simultánea de los campos eléctricos y magnéticos producidos por una carga eléctrica en movimiento. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles, las que se producen por ondas electromagnéticas, entre estas, la radiación infrarroja.

Se muestra las distintas bandas del espectro electromagnético en la tabla N°2.2 siguiente.

Tabla N°2.2: Matriz con ponderaciones.

Banda	Longitud de onda(m)	Frecuencia(Hz)
Rayos Gamma	$<10 \times 10^{-12}$	$>30 \times 10^{18}$
Rayos X	$<10 \times 10^{-9}$	$>30 \times 10^{15}$
Ultravioleta extremo	$<200 \times 10^{-9}$	$>1,5 \times 10^{15}$
Ultravioleta cercano	$<380 \times 10^{-9}$	$>7,89 \times 10^{14}$
Luz visible	$<780 \times 10^{-9}$	$>384 \times 10^{12}$
Infrarrojo cercano	$<2,5 \times 10^{-6}$	$>120 \times 10^{12}$
Infrarrojo medio	$<50 \times 10^{-6}$	$>6 \times 10^{12}$
Infrarrojo lejano	$<1 \times 10^{-3}$	$>300 \times 10^9$
Frecuencia ultra alta	<1	$>300 \times 10^6$
Onda de radio corta	<180	$>1,7 \times 10^6$
Onda de radio media	<650	$>650 \times 10^3$
Onda de radio larga	$<10 \times 10^3$	$>30 \times 10^3$

Onda de radio baja	$>10 \times 10^3$	$<30 \times 10^3$
--------------------	-------------------	-------------------

Fuente: Elaboración propia.

2.7.4. Radiación Infrarroja

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética, se produce por los cambios de estados de energía de electrones orbitales en los átomos o en los estados vibratorios y rotacionales de los enlaces moleculares. Todos los cuerpos a temperatura superior al cero absoluto emiten este tipo de radiación. La forma de medir este tipo de radiación sigue los siguientes principios.

Radiación de un cuerpo negro, es un caso ideal que hace referencia a que toda la energía exterior de un cuerpo es absorbida y toda energía del interior del mismo es emitida.

Ley de Stefan-Boltzmann para un cuerpo negro, establece la relación de flujo de energía por unidad de área.

$$W = \alpha \times T^4 \text{ (Ley de Stefan-Boltzmann (cuerpo negro) (Ec. 2.1))}$$

Dónde:

W: Energía por unidad de área.

α : Constante de Stefan Boltzmann.

T⁴: Temperatura absoluta.

Ley de Stefan-Boltzmann para un cuerpo opaco, ningún elemento es tan ideal como para comportarse como un cuerpo negro, es decir parte de la energía es emitida y otra reflejada la ecuación anterior queda de la forma siguiente:

$$W = \Gamma \times \alpha \times T^4 \text{ (Ley de Stefan-Boltzmann (cuerpo opaco) (Ec. 2.2))}$$

Dónde:

F: Emisividad.

W: Energía por unidad de área.

α : Constante de Stefan Boltzmann.

T⁴: Temperatura absoluta.

La Emisividad mide la cantidad de energía que pueden absorber o emitir los cuerpos. Estos valores de Emisividad se obtienen en tablas o experimentalmente los objetos pulidos

(reflectantes) tienen una Emisividad cercana a cero y los cuerpos más oscuros tendrán una Emisividad cercana a uno (cuerpo negro).

2.7.5. Cámara Termográfica

Las cámaras termográficas son instrumentos que miden la radiación infrarroja y convierte la señal en una imagen de esa radiación. Con la cámara termográfica se pueden distinguir las distribuciones de temperatura que no se pueden percibir de forma fácil.

Las cámaras se utilizan en una serie de actividades como en medicina (patologías en las mamas, problemas respiratorios, desordenes urinarios etc.), en sistemas eléctricos para la inspección de sus componentes, en instalaciones mecánicas (lubricación, errores de alineación, motores etc.), tuberías en su sistema de aislación, entre otras aplicaciones.

2.7.6. Inspecciones Eléctricas con Termografía

La razón por la que la termografía es tan indicada para mantenimiento de sistemas eléctricos, es que los componentes eléctricos comienzan a deteriorarse desde el mismo momento en que se instalan. Independientemente de la carga de un circuito, la vibración, la fatiga y el paso del tiempo, hacen que las conexiones eléctricas se aflojen, a la vez que las condiciones ambientales pueden acelerar su proceso de corrosión.

Cuando una conexión tiene un tipo de daño, su resistencia eléctrica aumenta y dado que al aumentar la resistencia también aumenta la caída de tensión, se genera un aumento de la temperatura (ley de Joule), se puede detectar el fallo antes de que se produzca una avería utilizando una cámara termográfica.

La termografía, lo que hace es detectar estos puntos de mayor temperatura, para poder corregirlos. El deterioro de una conexión eléctrica se puede dar debido a varias causas. Se pueden mencionar las siguientes:

- Vibración de los cables.
- Conectores dañados.
- Conectores con mucha suciedad.
- Mala utilización de conectores (corrosión galvánica)
- Conectores mal especificados.

Las inspecciones eléctricas buscan encontrar conexiones con temperaturas superiores (puntos calientes) al resto o al ambiente, esto se hace según las especificaciones de NETA (International Electrical Testing Association), que indica las diferencias de temperatura, clasificación y las recomendaciones a seguir como lo indica el cuadro siguiente.

Tabla N°2.3: Criticidad de temperatura NETA.

Diferencia de Temperatura sobre elemento referencia.	Diferencia de Temperatura sobre temperatura ambiente.	Clasificación.	Recomendaciones.
1°C-4°C	1°C-10°C	Posible deficiencia	Seguimiento en próxima mantención
°C-15°C	11°C-21°C	Probable deficiencia	Reparar en la próxima parada
Sobre 15°C	21°C-40°C	Deficiencia	Reparar tan pronto sea posible
Sobre 15°C	Sobre 40°C	Deficiencia mayor	Reparar de forma urgente

Fuente: International Electrical Testing Association.

A continuación, la figura 2.5, es un ejemplo de lo anterior se observa que el punto superior se encuentra a una temperatura de 51,3°C y el punto paralelo a 26,5°C, lo que indica que hay una diferencia de temperatura sobre el elemento de referencia de 24,8°C, al utilizar la tabla 2.3 indica que tiene una clasificación de deficiencia en el tablero eléctrico y se recomienda reparar tan pronto sea posible.

Figura N°2.5: Anomalía en instalación eléctrica.



Fuente: NETA.

2.8. Importancia del Mantenimiento

El mantenimiento dentro de la industria es el motor de la producción, sin mantenimiento no hay producción.

Todo equipo está sujeto a normas constantes de mantenimiento, dando así alta confiabilidad a la industria; Durante el transcurso del curso descubrimos que el mantenimiento es un proceso en el que interactúan máquinas y para generar ganancias, las inspecciones periódicas ayudan a tomar decisiones basadas en parámetros técnicos.

El desempeño de la empresa está sujeto a la calidad de mantenimiento que se provea a cada uno de los elementos, es de suma importancia tener una visión a futuro, planificar y programar el mantenimiento para cubrir toda el área en el tiempo, sea a mediano o largo plazo y además reducir costos de repuestos y materiales, para un mejor desempeño;

El mantenimiento está enfocado en la mejora continua y prevención de fallas, mediante una organización que documenta la misma y ayuda al trabajo en equipo, y preparación constante para actuar sin dejar la producción.

En la industria el jefe de mantenimiento debe ser un especialista en organización gerencial, para asegurar que todas las tareas de mantenimiento se hagan correcta y eficientemente.

2.8.1. Ventajas y Desventajas

Muchas son las ventajas al aplicar el mantenimiento eficiente y correctamente, en forma general es garantizar la producción, y mantener los equipos operables aumentando la vida útil.

Hay modelos de mantenimiento que ayudan a una inspección constante para tomar decisiones basadas en criterios de ingeniería y desempeño de los elementos que conforman la producción.

La planificación ayuda a documentar los mantenimientos que se aplica a cada uno de los equipos, llevar un histórico de desempeño y prevenir fallas.

El análisis del mantenimiento brinda instrumentos que ayudan a llevar una codificación según criticidad de los elementos.

Como se puede mencionar que en el caso de que falle el equipo, un interventor del equipo pone en riesgo todo el sistema de mantenimiento.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD

3.1. Análisis de Criticidad

Según (“El Análisis de Criticidad, una Metodología para mejorar la Confiabilidad Operacional,” n.d.), el objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable.

La criticidad se puede expresar como:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia} \quad (\text{Ec.3.1})$$

Donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y, la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente.

En función de lo antes expuesto se establecen como criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad los siguientes:

- Seguridad
- Ambiente
- Producción
- Costos (operacionales y de mantenimiento)
- Tiempo promedio para reparar
- Frecuencia de falla

Según (Romero Carranza, 2016), para determinar la criticidad de una unidad o equipo se utiliza una matriz de frecuencia por consecuencia de la falla, en la cual un eje representa la frecuencia de falla y en otro los impactos o consecuencias en los cuales incurrirá la unidad o equipo en estudio si le ocurre una falla. A continuación, la figura 3.1 muestra la matriz de criticidad que clasifica de acuerdo al color (verde, amarillo, rojo) dicho análisis hacia los componentes.

Figura N°3.1: Matriz de criticidad.



Fuente: [1].

Para realizar en Análisis de Criticidad debes seguir los siguientes pasos:

1. Definir los niveles en donde se realizará el análisis, ya sea equipos, sistema u instalación de acuerdo con los requerimientos de jerarquización de activos.
2. La estimación de la frecuencia de falla y el impacto total o consecuencia de las fallas, las cuales pueden ser daños al personal, daños a las instalaciones, impacto a la producción, impacto al ambiente e impacto a la población.
3. Calculo de nivel de criticidad: para determinar el nivel de criticidad de una instalación, sistema, equipo o elemento se debe emplear la fórmula mencionada anteriormente. Luego una vez obtenido el valor de la criticidad, se busca en la matriz de criticidad, para determinar el nivel de criticidad de acuerdo con los valores y la jerarquización establecidos.
4. Análisis y Validación de los resultados: Los resultados obtenidos deberán ser analizados a fin de definir acciones para minimizar los impactos asociados a los modos de falla identificados que causan la falla funcional.
5. Definir el nivel de análisis: La valoración del nivel de criticidad y la identificación de los activos más críticos permitirá orientar los recursos y esfuerzos a las áreas que más lo ameriten, así como gerenciar las acciones de mitigación del riesgo en elementos subsistemas, considerando su impacto en el proceso.
6. Determinar la criticidad, dado que, si el valor de criticidad se debe a valores altos en alguna de las categorías de consecuencias, las acciones deben orientarse a

mitigar los impactos que el evento (modo de falla o falla funcional) puede generar. Dentro de las acciones o actividades que se recomiendan, se pueden incluir la aplicación de metodologías basadas en confiabilidad.

7. Sistema de Seguimiento de control: Después de la selección de las acciones de mejora en las frecuencias de ocurrencia de los eventos y mitigación de impactos se debe crear y establecer en Seguimiento y Control, para garantizar el monitoreo de la ejecución de las acciones seleccionadas y el cumplimiento de las recomendaciones consecuentes del análisis de criticidad, el cual permitirá asegurar la continuidad en el tiempo de la aplicación de los planes de acción y monitorear los cambios o mejoras que pueden derivarse de la aplicación de las acciones generadas como resultados de los análisis.

3.2. Operacionalización de Variables

Según el objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Las variables a estudiar que contemplan dicho análisis corresponden a las de carácter independiente y dependiente con su respectiva descripción.

3.2.1. Variable Independiente

Herramienta de Confiabilidad Operacional.

3.2.1.1. Indicadores de la Variable Independiente

- Confiabilidad.
- Análisis de Riesgo Crítico.
- Tasa de Fallas.
- Disponibilidad.

3.2.2. Variable Dependiente

- Presupuesto de Capital de Mantenimiento (CAPEX), ver Anexo B.

3.2.2.1. Indicador de la Variable Dependiente

Efectividad de gasto de componentes capitalizables.

La tabla 3.1, muestra la Operacionalización de las variables que tienen foco en el análisis de la criticidad, donde se indica una definición conceptual, dimensiones e indicadores, el indicador MTBF indica que es el tiempo promedio que un equipo, máquina, línea o planta cumple su función sin interrupción debido a una falla funcional.

Se obtiene dividiendo el tiempo total de operación entre el número de paros por fallas.

Tabla N°3.1: Operacionalización de variables.

Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Herramientas de Confiabilidad Operacional	Una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan en forma sistemática, avanzadas metodologías de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. La Confiabilidad Operacional lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional (Durán, 2000)	Confiabilidad Análisis de Riesgo Crítico Tasa de Falla Disponibilidad	El Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) = Probabilidad x Consecuencia =1/El Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) = (Tiempo Requerido – Tiempo de Parada del Equipo) / Tiempo Disponible
Presupuesto de Capital mantenimiento	La serie de inversiones que se realizan en los diferentes equipos e instalaciones con el fin tanto de mantener como de aumentar los niveles de la producción, o también, para mantener el funcionamiento de un negocio o un sistema particular (Amendola, y otros, 2016)	Capital Expenditure – Inversiones de Capital	=US\$ Uso de repuestos comprados / US\$ Total de repuestos Presupuestados

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Diseño de la Investigación

La presente investigación es de tipo Pre-experimental, debido a que se trata de la evaluación de la situación inicial de la Gerencia de Mantenimiento en el ámbito del proceso de la elaboración del presupuesto de repuestos capitalizables (CAPEX), posteriormente la evaluación de la situación actual, luego de la implementación de las herramientas de confiabilidad para la optimización de dicho proceso

$$GE: O_1 \rightarrow X \rightarrow O_2 \quad (\text{Ec.3.2})$$

Dónde:

GE: Grupo experimental, son activos críticos involucrados en la elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento.

O₁: Pre prueba, toma de muestra de la elaboración del mantenimiento, antes de la optimización mediante el uso de herramientas de confiabilidad operacional.

O₂: Post Prueba, toma de muestra de la elaboración del mantenimiento, después de la optimización mediante los usos de herramientas de confiabilidad operacional.

X: Manipulación de Variable independiente, aplicación de herramientas de confiabilidad operacional.

3.4. Unidad de Estudio

Conjunto de actividades involucradas en la elaboración de presupuesto capital en una planta concentradora de mineral.

3.4.1. Población.

La población para el proyecto de título incluye a todos los activos críticos de la planta concentradora de mineral.

3.4.2. Muestra.

Se toma como muestra incluye a todos los activos críticos de la planta concentradora de mineral.

3.4.3. Técnicas, Instrumentos y Procedimientos de Recolección de Datos

Las Técnicas que se utilizarán para recolectar los datos para la presente investigación, se describen a continuación en la tabla 3.2.

Tabla N°3.2: Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.

FUENTE	TÉCNICA	INSTRUMENTO	JUSTIFICACIÓN
Primaria	Observación directa	Guía de Observación Participación en de reuniones elaboración de Presupuesto.	Permite observar la metodología de reuniones grupales y los criterios de elaboración del presupuesto.
Primaria	Entrevista	Guía de Entrevista	
Secundaria	Análisis documentos	de Formato elaboración presupuesto. Requisiciones compra	de Permite conocer criterios de la elaboración del presupuesto.
Secundaria	Revisión de base de datos	Sistema planificación recursos empresariales (ERP, por sus siglas en inglés, <i>enterprise resource planning</i>)	de Permite obtener información histórica de los activos como tasa de falla, disponibilidad entre

Fuente: Elaboración propia.

Observación Directa

Objetivo

Identificar la metodología de las reuniones de elaboración del presupuesto de capital (CAPEX) de la gerencia de mantenimiento.

Procedimiento

Observar la participación del personal involucrado, superintendentes, planificadores, personal del área de mantenimiento predictivo. Y registrar por medio de una minuta de participación.

Instrumentos

- Minuta o acta de reunión.

- Guía de observación.
- Lapicero y papel.

3.5. Métodos, Instrumentos y Procedimientos de Análisis de Datos

3.5.1. Programas para Análisis de Datos:

- SPSS o Stata.
- Programación en R.
- Python.
- Microsoft Power BI.

3.5.2. Procedimiento

Una vez recabada la información y la adquisición de datos, se procede a clasificar y analizar la información, enfocada principalmente en las variables de estudio, para lo cual se tiene en cuenta 3 aspectos:

- **Validación:** Verificar la confiabilidad de datos e información.
- **Introducción de datos:** Para el uso de programas especializados, por medio de una computadora personal.
- **Análisis:** Analizar e interpretar los resultados de la entrevista y observación.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO ECONÓMICO

En el presente capítulo se dan a conocer los resultados de los análisis del proceso de elaboración del presupuesto de capital, la evaluación de situación inicial que se desarrolla anualmente en más de una década, cómo práctica habitual.

De igual manera, se muestra el análisis a detalle de la situación actual luego de la aplicación e implementación de las herramientas de confiabilidad, y finalmente se presentan alternativas para una evaluación en conjunto y objetiva, que facilite a la Gerencia de Mantenimiento de la minera CAP, tomar las decisiones en torno a la compra de equipos críticos capitalizables.

4.1. Análisis Inicial del Proceso de Elaboración del Presupuesto de Capital

A continuación, se detalla el proceso inicial que incluye documentación, lineamientos y prácticas empíricas de elaboración del presupuesto anual.

4.1.1. Política Interna

Como antecedente se puede precisar que existe solo un documento sobre el proceso de la elaboración del presupuesto de capital, y este es de carácter genérico para todas las Gerencias de la Compañía Minera, como son; La Gerencia de Operaciones, la Gerencia de Recursos Humanos, la Gerencia de Proyectos, entre otras.

El documento en mención se denomina “Políticas de Administración de Inversiones de Capital (CAPEX)”, desarrollada por el área de Finanzas. El propósito principal de esta política es estandarizar el proceso de gastos y enfocarlo con las políticas y objetivos estratégicos de la empresa. Esta política permite; Definir los montos de gastos que se registrarán por la política interna y establecer los niveles aprobación.

4.1.2. Procedimiento de Elaboración

El proceso se inicia con una reunión liderada por el área de Planeamiento donde participaran todas las jefaturas de la gerencia de mantenimiento como por ejemplo el área de ejecución mecánica, eléctrica, instrumentación finalmente el área de confiabilidad.

En esta primera reunión las jefaturas presentan su primera lista de equipos críticos y expondrán las justificaciones para la toma de decisión, muchas de las justificaciones

carecen sustentos técnicos y están más orientadas al tiempo de vida estimada de un activo considerado en el plan de mantenimiento original.

En esta primera reunión todas las disciplinas consolidan una lista “preliminar” de repuestos a ser adquiridos en los próximos 5 años.

Una vez que se cuenta con esta lista consolidada el área de planeamiento valida el cronograma de cambio de componente y si esta fuera de cronograma para a lista de revisión, caso contrario permanece en la lista de compra.

Por su parte el área de confiabilidad se encarga de revisar las tasas de falla de los componentes de los últimos años a fin de priorizar la lista de compra.

Una vez estudiados los costes conocidos previamente CAPEX, por el área de planificación, se llama a una segunda reunión para difundir los costos de los equipos a fin que entre la gerencia y las jefaturas se toma la decisión de compra en los próximos 5 años, manteniendo la priorización de compra con la indicación del área de confiabilidad enfocado únicamente en la tasa de falla del activo.

Por último, la gerencia valida la lista con la precisión de los costos actualizados y en base a restricciones económicas dictadas por los planes de producción y los planes de mantenimiento a 5 años se tomar la decisión del año de compra.

4.1.3. Costo Total de Eficiencia/Ineficiencia de Compras de Repuestos

La evaluación sobre la eficiencia de gastos anuales se mide por el total de costos de componentes utilizados durante el año entre los costos CAPEX presupuestados.

En planta concentradora, en los 3 últimos años se tiene un porcentaje de cumplimiento inferior al 80%, lo cual indica que el presupuesto no está siendo usado de manera eficiente, ya que, para una adecuada gestión presupuestaria y uso de repuestos críticos aceptable, se debería alcanzar por lo menos el 95% de eficiencia según estándares financieros internos y de acuerdo a lo observado en la tabla 4.1.

Tabla N°4.1: Eficiencia compra equipos críticos en planta concentradora.

Año	2014	2015	2016
US\$ Presupuesto CAPEX	\$1.000.000	\$1.100.000	\$1.150.000
US\$ Utilización del Comp.	\$752.300	\$738.900	\$916.600
Eficiencia de Gasto CAPEX (%)	75,2	67,2	79,7

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la tabla 4.2 y la falta de repuestos en almacén concentradora generó en los tres últimos tres años una pérdida por lucro cesante (por dejar de producir) de casi el 60% del presupuesto del año 2016. Al no contar con repuestos produjo 2 detenciones de 2 equipos críticos de 8,5 horas y 19,3 horas los años 2014 y 2015 respectivamente.

Tabla N°4.2: Eficiencia en la ejecución de compra de repuestos críticos de planta concentradora.

Equipos Críticos	2014	2015	2016
Chancadora 1	-	-	-
Faja 1	-	-	-
Molino 1	-	\$482.500	-
Molino 2	-	-	-
Molino 3	-	-	-
Molino 4	\$212.500	-	-
Sistema de Bombeo 1	-	-	-
Sistema de Bombeo 2	-	-	-
Total	\$212.500	\$482.500	\$0,00
Total (3 años)		\$695.000	

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Disponibilidad y Confiabilidad de Equipos Críticos

La indisponibilidad de los equipos críticos por la espera de repuestos, se ve reflejada directamente en la pérdida de disponibilidad y confiabilidad de planta, afectando la producción, generando pérdidas por dejar de producir o lucro cesante.

La tabla 4.3, indica que en el año 2014 se registra una detención por falla eléctrica del Molino de Bolas #4. La espera del repuesto toma aproximadamente 8,5 horas, la disponibilidad para ese año, fue de 93,5%. Mientras que el siguiente año se tiene otra falla mecánica que originó la detención intempestiva del molino #1 por 19,3 horas, debido a la espera del componente dañado. La disponibilidad del equipo es de 95%.

Tabla N°4.3: Disponibilidad y confiabilidad equipos críticos de planta concentradora. Período 2014-2016.

Equipos Críticos	Indicador	Unidad	2014	2015	2016
Chancadora 1	Disponibilidad	%	98,5	97,8	96,7
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	738	650	733
Faja 1	Disponibilidad	%	90	87	95
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	536	480	520
Molino 1	Disponibilidad	%	97	95	98,7
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	585	528	732

Molino 2	Disponibilidad	%	97	98	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	645	720	680
Molino 4	Disponibilidad	%	93,5	98	99
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	485	560	650
Sistema de Bombeo 1	Disponibilidad	%	97	98	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	524	655	531

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Aplicación de Herramientas de Confiabilidad

Determinar la metodología correcta para la compra de repuestos, en general puede ser una tarea ardua y desalentadora. Existe una fina línea entre rentabilidad y confiabilidad por lo que, muchas veces la estrategia de las empresas favorece una u otra.

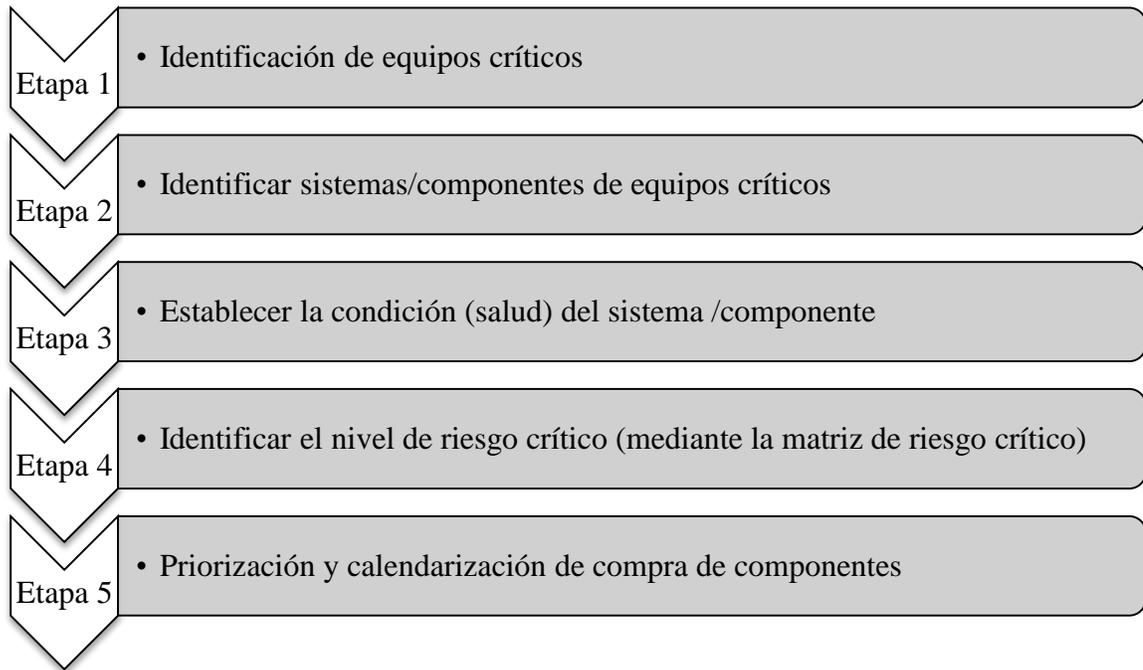
Los aportes de los fabricantes de los equipos puede ser una referencia, sin embargo, puede ser contraproducente para los intereses de la compañía, ya que en muchos de los casos los repuestos están a la mitad de su vida útil, siendo las propuestas extremadamente conservadoras.

Por otro lado, cuando hay una política marcada para que los equipos funcionen más allá de su capacidad y para lo que han sido diseñados, se puede dar como resultado intervenciones no planificadas frecuentemente, con costos asociados a mano de obra, materiales y pérdidas de producción.

Por otro lado, si las políticas se inclinan hacia el mantenimiento de los activos, la disponibilidad de los activos puede verse gravemente afectada e impactar en la rentabilidad. Es importante encontrar un punto óptimo entre dos enfoques, para garantizar una cantidad adecuada de repuestos críticos y que al mismo tiempo impulse la rentabilidad.

Este estudio desglosa el proceso para analizar, establecer e implementar una estrategia de toma de decisión objetiva y fundamentada para la compra de repuestos críticos capitalizables en cinco etapas, las cuáles se describen en la figura 4.1.

Figura N°4.1: Proceso de cinco etapas para la toma de decisión de compra de repuestos críticos capitalizables.



Fuente: Elaboración propia.

Etapa 1. Establecer los Equipos Críticos

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

Para el inicio de la metodología se revisa la configuración de planta o diagrama de flujo del proceso (PDF) por sus siglas en inglés Process Flow Diagram, y se consolida la totalidad de activos.

En el ejercicio de identificación de equipos críticos de planta concentradora se contabilizan 125 activos, los cuales intervienen directa o indirectamente con el proceso productivo.

Ante el variado universo de equipos, se ha logrado identificar el 10% con alto impacto a la producción, el estudio de criticidad por lo tanto se basa en 12 equipos.

Los activos identificados como importantes por su impacto en el proceso productivo, ingresaran a la matriz de valorización de la criticidad de los activos, con la finalidad de priorizar los análisis de condición de la salud del equipo y sus componentes, y de esta manera priorizar el ejercicio presupuestario de compra de repuestos.

Para el análisis de criticidad de equipos que se informa en la tabla 4.4, se toman en cuenta factores como: frecuencia de falla, tiempo promedio para reparar (MTTR), impacto operacional, impacto en la seguridad, costo del repuesto y el tiempo de llegada del repuesto al almacén de Mina (Lead time). Se emplea la siguiente valoración para cada uno de los factores mencionados, donde (1) muy bajo, (2) bajo, (3) medio y (4) alto.

La siguiente tabla 4.4, se muestra los rangos de criticidad para la calificación de los resultados del análisis realizado a los activos de planta concentradora, según corresponda: Criticidad alta, media o baja.

Tabla N°4.4: Análisis de criticidad.

<i>Análisis de Criticidad</i>	
Factor	Valor
Frecuencia de Falla	
Una sola falla cada 2 años	1
Una sola falla cada año	2
Entre dos a seis fallas al año	3
Más de seis fallas al año	4
Tiempo promedio para reparar (MTTR)	
Menos de 1 hora	1
Entre 1 a 3 horas	2
Entre 4 a 3 horas	3
Más de 5 horas	4
Impacto operacional	
Afecta menos al 10% de la producción	1
Afecta entre 10 a 30% de la producción	2
Afecta entre 30 a 50% de la producción	3
Afecta más del 50% de la producción	4
Impacto en la Seguridad	
Cero riesgos personales ni materiales	1
Riesgo bajo de personas / materiales	2
Riesgo medio	3
Riesgo alto	4
Costo del repuesto	
Menos de US\$ 5K	1
Entre US\$ 5K y 50K	2
Entre US\$ 50K y 150K	3
Mayor de US\$ 150K	4
Tiempo de llegada de repuesto (Lead Time)	
Menos de 15 días	1
Entre 15 días a 1 mes	2
Entre 1 mes a 6 meses	3
Más de 6 meses	4

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 4.5, se muestra la calificación del índice de criticidad para la priorización de activos, que son estudiados, a fin de elaborar el presupuesto de mantenimiento enfocado en la criticidad de los activos de acuerdo a sus rango y color.

Tabla N°4.5: Rango de evaluación de criticidad.

Rango de criticidad	
30 < índice de Criticidad < 50	Criticidad alta – Color Rojo
20 < índice de Criticidad < 29	Criticidad Media – Color Amarillo
5 < índice de Criticidad < 19	Criticidad Baja – Color Verde

Fuente: Elaboración propia.

En el anexo A se muestra la totalidad de equipos de planta evaluados, de acuerdo a la priorización, por otra parte, en la tabla 4.6 se indica el ID, TAG del equipo y descripción el índice de criticidad de estos, los destacados en color rojo poseen una alta criticidad, en color amarillo es media su criticidad y finalmente en color verde su criticidad es baja., lo que busca priorizar los esfuerzos y recursos de la compañía.

Tabla N°4.6: Calificación del índice de criticidad para priorización de activos.

ID	TAG de equipo	Descripción	FF		CONSECUENCIA DE FALLA (CF)				FF*CF
			Frec. de Falla	Tiempo Prom. Repar.	Impacto Oper.	Impacto en Seguridad	Costo del repuesto	Llegada al almacén	Índice de Criticidad
1	31-BM-002	Molino de Bolas 2	3	3	3	1	4	4	45
2	31-PS-002	Sistema Bombeo 2	3	1	3	1	2	3	30
3	31-BM-003	Molino de Bolas 3	2	2	3	1	4	4	28
4	31-CB-001	Faja 1	2	3	4	1	3	2	26
5	31-PS-001	Sistema Bombeo 1	2	1	3	1	2	3	20
6	31-CM-007	Chancadora 1	1	3	4	1	4	4	16
7	31-BM-001	Molino de Bolas 1	1	1	3	1	4	4	13
8	31-BM-004	Molino de Bolas 4	1	1	3	1	4	4	13
9	31-CB-021	Faja 2A	1	2	3	1	2	2	10
10	31-CB-022	Faja 2B	1	2	3	1	2	2	10
11	31-HR-001	Harnero 1	1	1	2	1	2	2	8
12	31-HR-002	Harnero 2	1	1	2	1	2	2	8

Fuente: Elaboración propia.

Etapa 2. Identificar Sistemas y Componentes de Equipos Críticos

En esta etapa se desglosan los equipos críticos previamente identificados en sistemas y componentes. Por ejemplo: El molino de bolas 2 en la tabla de criticidad 4.6 se obtiene el mayor índice, por lo que el activo se desglosa en sistemas y componentes a fin de realizar los análisis por condición.

Tabla N°4.7: Sistemas y componentes críticos.

Equipo		Molino de Bolas 2 (TAG 31-BM-002)
Sistema	ID	Componente
Sistema Hidráulico	1	Trunnion - Feed
	2	Bearing Pads - Feed
	3	Trunnion - Discharge
	4	Bearing Pads - Discharge
Sistema Eléctrico	1	Estator
	2	Bobinas
	3	Rotor
	4	Polos
	5	e-house
Sistema Estructural Mecánico	1	Tapa de Alimentación
	2	Cilindro 1
	3	Cilindro 2
	4	Tapa de descarga
	5	Pernos de Trunnion – Tapa Alimentación
	6	Pernos Tapa Alimentación Shell
	7	Pernos Shell cilindro 1 – Cilindro 2
	8	Pernos Trunnión – Tapa descarga

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para fines didácticos que ayuden a comprender la metodología, se desarrolla el proceso para el equipo Molino de Bolas.

Etapa 3. Establecer la Condición o Salud de Sistemas y Componentes de Equipos Críticos

En esta etapa se identifican los sistemas con mayor tasa de fallas y los componentes que pueden ser monitoreados, a fin de predecir su comportamiento confiable en un periodo determinado, o en su defecto identificar alertas tempranas para priorizar la intervención de los equipos y asegurar la confiabilidad requerida.

Los componentes a ser monitoreados son aquellos que responden a un comportamiento captado por técnicas predictivas o de monitoreo de condición, en las que destacan el análisis de vibraciones, análisis de aceite, análisis de corriente, análisis de comportamiento de elongación de pernos, y también se incluyen los ensayos no destructivos (NDT) non destructive testing por sus siglas en inglés, entre otras técnicas.

Para el caso de los molinos de bolas se identifican componentes que pueden ser monitoreados, como, por ejemplo; la condición de pernos estructurales, fisuras internas y corrosión interna estructural.

Además, los sistemas eléctricos pueden ser monitoreados por medio de técnicas de análisis de corriente y se cuenta con la tasa de fallas históricas. La tabla 4.8, muestra el grado de monitoreo y análisis histórico a fin de determinar la confiabilidad y la condición del activo en base a la descripción de la técnica descriptiva y sistema de historial.

Tabla N°4.8: Matriz de componentes monitoriables y con historial de fallas

Equipo		Molino de Bolas		
Sistema	ID	Componente	Técnica Predictiva	Sistema de Historial de fallas
Sistema Hidráulico	1	Trunnion – Feed	A.V	SI
	2	Bearing Pads – Feed	A.A	SI
	3	Trunnion – Discharge	A.V	SI
	4	Bearing Pads - Discharge	A.A	SI
Sistema Eléctrico	1	Estator	A.C	SI
	2	Bobinas	A.C	SI
	3	Rotor	A.C	SI
	4	Polos	A.C	SI
Sistema Estructural Mecánico	1	Tapa de Alimentación	NDT	SI
	2	Cilindro 1	NDT	SI
	3	Cilindro 2	NDT	SI
	4	Tapa de descarga	NDT	SI
	5	Pernos de Trunnion – Tapa Alimentación	E.P	SI
	6	Pernos Tapa Alimentación Shell	E.P	SI
	7	Pernos Shell cilindro 1 – Cilindro 2	E.P	SI
	8	Pernos Trunnión – Tapa descarga	E.P	SI

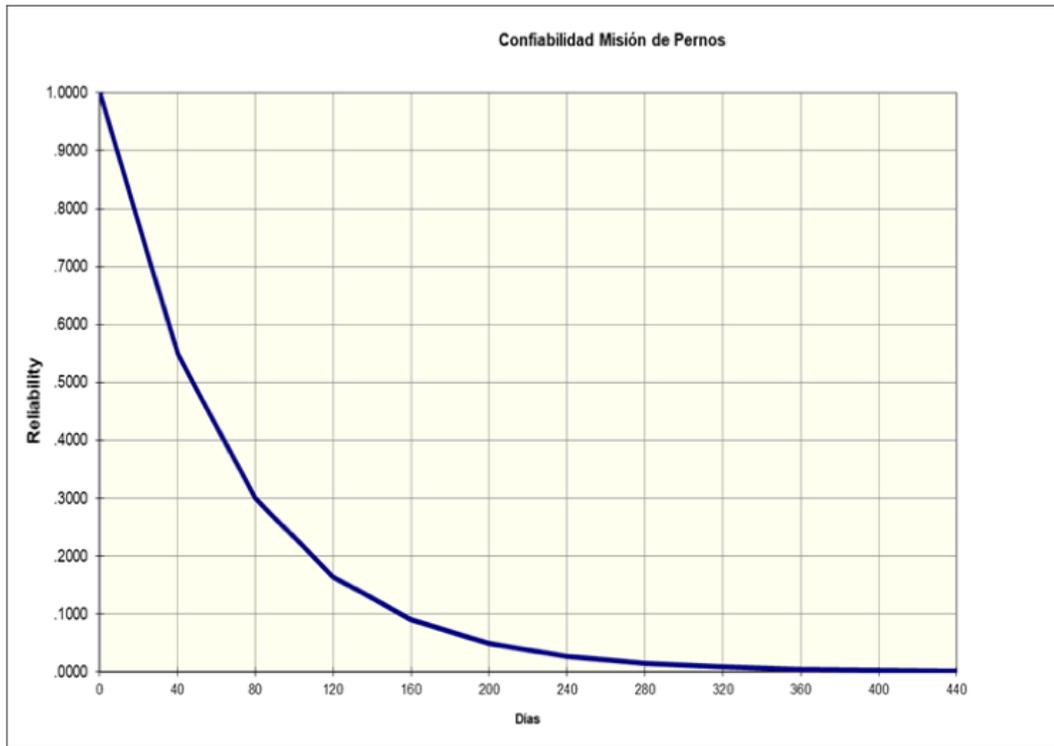
Leyenda:

- A.A Análisis de Aceite
- A.C Análisis de corriente
- A.V Análisis de Vibraciones
- NDT Ensayo no destructivo (Ultrasonido)
- E.P Medición de elongación de Pernos

Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, para la identificar la confiabilidad de los pernos críticos, se cuenta con el historial de tasa de fallas la cual permite calcular la confiabilidad del sistema de sujeción de los pernos como se observa en la figura 4.2.

Figura N°4.2: Curva de confiabilidad de pernos críticos-tapa de descarga.



MTBF and MTTR		
Total production time (up time + down time)	12936	Hours
Down Time	154.7	Hours
Number of breakdowns	8	Hours
Mean Time Between Failures (MTBF)	66.5	Days
Mean Time To Repair (MTTR)	19.3	Hours

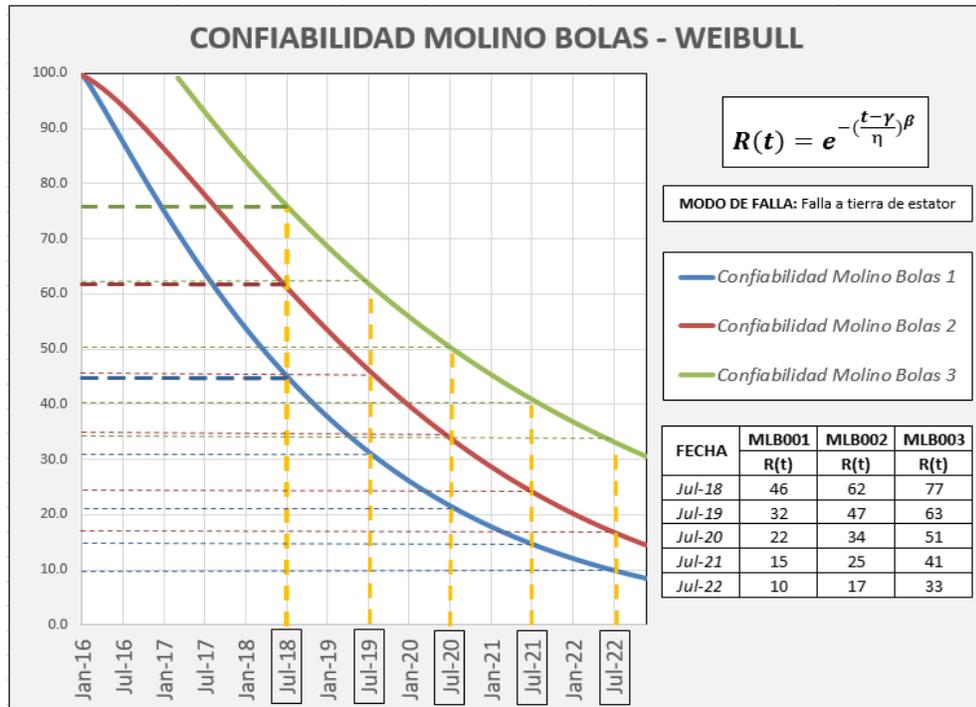
Figura: Elaboración propia.

De acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior, para el análisis de sistema eléctrico se tiene información del modo de fallas de las puestas a tierra, por tanto, se tiene información relevante para el desarrollo de la curva de confiabilidad y posterior priorización de intervención.

El análisis de confiabilidad mostrado tiene como objetivo evaluar, de manera metódica y cuantitativa, el nivel de riesgo que representa el modo de falla a tierra del estator en los molinos de bolas. La metodología determina la confiabilidad de los molinos mediante la evaluación de su desempeño histórico asociado con fallas a tierra del estator, con lo que

se calcula la probabilidad de ocurrencia de una falla a tierra a futuro, como observa en la figura 4.3.

Figura N°4.3: Curva de confiabilidad-estatores de molino.



Fuente: Elaboración propia.

Etap 4. Identificar el Nivel de Riesgo Crítico por medio de la Matriz de Riesgo Crítico

Una vez demostrada objetivamente la condición de los activos por medio de las técnicas predictivas y por medio del análisis de la tasa de fallas, traducidas en el análisis de confiabilidad, se procede a ingresar en la tabla de valorización de riesgo valores numéricos del 1 al 25 desarrollados en la Matriz de Riesgo Crítico.

La Matriz de Riesgo Crítico, que se muestra en la tabla 4.9, es un desarrollo extremadamente minucioso con costos actualizados en detalle que permiten un análisis objetivo. Para el desarrollo de la matriz se requiere la participación multidisciplinaria a fin de consolidar puntos de vista de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de una falla catastrófica.

Tabla N°4.9: Matriz de riesgo crítico.

Grado de severidad	Consecuencias				Probabilidad				
	Clasificación	Seguridad	Impacto a Producción	Costo de Mantenimiento	1	2	3	4	5
					< 1%	1 % - 5%	5 % - 25 %	25 % - 50 %	> 50%
				Remoto	Extremadamente Improbable	Muy Poco Probable	Poco Probable	Probable	
5	Desastrosa	Varias fatalidades. Varias personas con lesiones permanentes.	Más de 20 días de producción perdida. Daño extensivo > \$ 8M	Daño extenso: > \$8M	5	10	15	20	25
4	Catastrófica	Una fatalidad. Estado vegetal. Enfermedad ocupacional avanzada.	De 14 a 20 días de producción perdida. Daño Mayor \$4M - \$8M	Daño Grave entre: \$4M - \$8M	4	8	12	16	20
3	Grave	Lesiones que incapacitan a la persona temporalmente. Lesiones por posición ergonómica. Lesiones parciales	De 6 a 14 días de producción perdida. Daño Localizado \$1M - \$4M	Daño Localizado entre: \$1M - \$4M	3	6	9	12	15
2	Seria	Lesiones que no incapacita a la persona temporalmente. Enfermedades que generan incapacidad temporal.	De 1.5 a 6 días de producción perdida. \$0.5M - \$1M	Daño menor entre: \$0.5M - \$1M	2	4	6	8	10
1	Moderada	Lesiones que no incapacitan a la persona.	Menos de 1.5 días de producción perdida. < \$0.5M	Daño leve: < \$1M	1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 4.10 se muestra la condición de los componentes críticos de acuerdo a la matriz. Para la evaluación de consecuencias de la matriz dichas fallas probables en función a su impacto a la producción y costos directos. Se procede a ponderar la probabilidad de falla con la consecuencia evaluada, determinándose de esta manera el nivel de riesgo generado.

Tabla N°4.10: Condición de componentes críticos y nivel de riesgo.

Item	Sistema	Componente	BM001			BM002			BM003			BM004		
			Seg.	Prod.	Mtto	Seg.	Prod.	Mtto	Seg.	Prod.	Mtto	Seg.	Prod.	Mtto
1	Sistema Hidráulico	Trunnion - Feed	3	12	10	3	12	10	3	12	10	5	5	5
2		Bearing Pads - Feed	3	12	10	3	12	10	3	12	10	5	5	5
3		Trunnion - Discharge	3	12	8	3	12	8	3	12	8	5	5	5
4		Bearing Pads - Discharge	3	12	8	3	12	8	3	12	8	5	5	5
Sistema Hidráulico			12	48	36	12	48	36	12	48	36			
5	Sistema Eléctrico	Estator	4	8	10	4	8	10	4	8	10	5	5	5
5.1		Bobinas	4	10	8	4	16	8	4	6	6	5	5	5
6		Rotor	3	8	10	3	8	10	3	8	10	5	5	5
6.1		Polos	3	10	5	3	10	5	3	10	5	5	5	5
7		E-House	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sistema Eléctrico			14	36	33	14	42	33	14	32	31			
8	Sistema Estructural	Tapa de Alimentación	2	5	3	2	5	3	4	10	6	2	5	3
9		Cilindro 1	2	5	3	2	5	3	4	10	6	2	5	3
10		Cilindro 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12		Tapa descarga	2	5	3	4	20	6	6	20	6	2	5	3
13		Pernos Trunnión-Tapa Alimentación	2	2	2	2	2	2	4	8	4	2	2	2
15		Pernos Tapa Alimentación - Shell	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16		Pernos Shell cilindro 1 - Shell cilindro 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21		Pernos Trunnión-Tapa Descarga	4	8	4	4	8	4	4	8	4	2	2	2
Sistema Estructural			28	44	32	45	105	62	42	86	52	28	43	33

BM001	<i>Molino de Bolas #1 – 30' x 41'</i>
BM002	<i>Molino de Bolas #2 – 30' x 41'</i>
BM003	<i>Molino de Bolas #3 – 30' x 41'</i>
BM004	<i>Molino de Bolas #4 – 30' x 41'</i>

NIVEL DE RIESGO			
BM001	BM002	BM003	BM004
130	197	168	61
ALTO	ALTO	ALTO	BAJO

Fuente: Elaboración propia.

Etapa 5. Priorización y Calendarización de Compra de Repuestos

Este paso consiste en evaluar los flujos futuros de caja que nos van a reportar dichas decisiones. A continuación, en la tabla 4.11 se muestra la matriz de compra de repuestos.

Tabla N°4.11: Matriz de priorización y calendarización para compra de repuestos.

Equipo			Molino de Bolas				
Sistema	ID	Componente	2017	2018	2019	2020	2021
Sistema Hidráulico	1	Trunnion - Feed					
	2	Bearing Pads - Feed					
	3	Trunnion - Discharge					
	4	Bearing Pads - Discharge	X			X	
Sistema Eléctrico	1	Estator	X		X		X
	2	Bobinas	X		X		X
	3	Rotor					
	4	Polos					
	5	e-house					
Sistema Estructural Mecánico	1	Tapa de Alimentación					
	2	Cilindro 1					
	3	Cilindro 2	X			X	
	4	Tapa de descarga	X			X	
	5	Pernos de Trunnion – Tapa Alimentación					
	6	Pernos Tapa Alimentación Shell					
	7	Pernos Shell cilindro 1 – Cilindro 2					
	8	Pernos Trunnión – Tapa descarga	X			X	

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Evaluación de la Situación Actual

Actualmente el proceso de elaboración del presupuesto de CAPEX se desarrolla con mayor objetividad tomando en cuenta la condición del activo. Se ha demostrado con evidencia que los activos están degradando sus componentes.

Ante evidencias empíricas se ha demostrado el grado de degradación de los componentes críticos, logrando predecir el cambio de componentes de manera oportuna.

Las reuniones se han reducido a dos, logrando eficiencia en la toma de decisiones de compra. El uso de los repuestos para el año pasado logro superar el 85% (ver anexo B).

Tabla N°4.12: Eficiencia de gasto CAPEX, PERÍODO 2014-2017.

Año	2014	2015	2016	2017
US\$ Presupuesto CAPEX	\$1,000,000.00	\$1,100,000.00	\$1,150,000.00	\$1,200,000.00
US\$ Utilización del Comp.	\$752,300.00	\$738,900.00	\$916,600.00	\$1,027,030.00
Eficiencia de Gasto CAPEX (%)	75.2	67.2	79.7	85.6

Fuente: Minera C.N.N.

El año 2017, luego de la implementación de la optimización de las herramientas de confiabilidad, no se registran eventos de detenciones por falta de equipos, cabe señalar que el 2016 tampoco registran eventos de detenciones por falta de repuestos críticos, sin embargo, se sabe que ese mismo año se genera una alta tasa de compra y utilización de repuestos además de un presupuesto superior a los años anteriores. El año 2017 se redujo el presupuesto en un plan de validación y justificación objetiva de la condición de los activos de acuerdo a lo informado en la tabla 4.13.

Tabla N°4.13: Impacto de detenciones por espera de repuestos. Período 2014-2017.

Equipos Críticos	2014	2015	2016	2017
Chancadora 1	-	-	-	-
Faja 1	-	-	-	-
Molino 1	-	\$482,500.00	-	-
Molino 2	-	-	-	-
Molino 3	-	-	-	-
Molino 4	\$212,500.00	-	-	-
Sistema de Bombeo 1	-	-	-	-
Sistema de Bombeo 2	-	-	-	-
TOTAL	\$212,500.00	\$482,500.00	\$0.00	\$0.00
TOTAL (4 Años)		\$695,000.00		

Fuente: Elaboración propia.

En líneas generales después de la implementación del mantenimiento, se optimiza los costos de compras, se desarrolla un cronograma, una lista de consumos de repuestos de manera objetiva bajo la filosofía de condición de los activos sustentados por su monitoreo.

4.1.6.1. Materia de Disponibilidad y Confiabilidad

Sin duda los indicadores de gestión más importantes para medir el correcto desempeño de la gestión de activos son la confiabilidad y disponibilidad de los equipos y sistemas.

Por ello, para la evaluación de la situación actual y la verificación de la efectividad del plan de abastecimiento de equipos críticos, producto de la implementación de las herramientas de confiabilidad, se compara el desempeño de los equipos durante el 2017, versus el desempeño de los 3 años anteriores.

Por otra parte, es importante respetar la disponibilidad presupuestada (Budget), debido a que los mantenimientos planificados son declarados un año antes y por consecuencia los tiempos de detención son comprometidos en la utilización de los equipos, para el cálculo de la producción y posterior ganancia neta por la venta del mineral.

Por tanto, se corrobora que el año 2017 muestra claramente una mejora significativa en la disponibilidad y confiabilidad en los molinos de bolas principalmente, considerando

que la disponibilidad está por encima de la disponibilidad presupuestada y además en la tabla 4.14 se tiene un nivel de confiabilidad (MTBF) aceptable.

Tabla N°4.14: Disponibilidad y confiabilidad de equipos críticos de planta concentradora. Período 2014-2017.

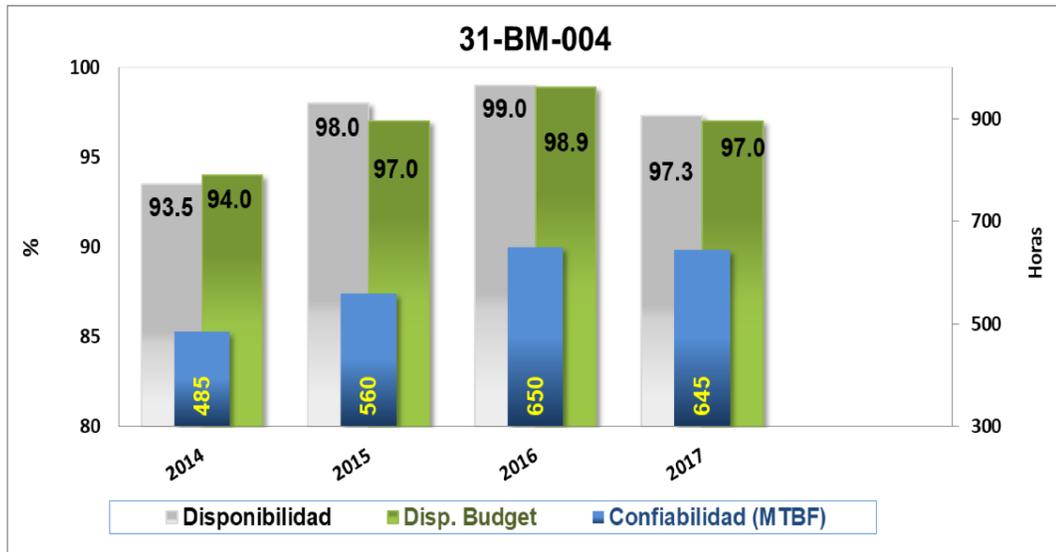
Equipos Críticos	Indicador	Unidad	2014	2015	2016	2017
Chancadora 1	Disponibilidad	%	98.5	97.8	96.7	97.2
	Disponibilidad (Budget)	%	98	98	98	98
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	738	650	733	655
Faja 1	Disponibilidad	%	90	87	95	96.3
	Disponibilidad (Budget)	%	90.5	87	90.5	96
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	536	480	520	434
Molino 1	Disponibilidad	%	97	95	98.7	99
	Disponibilidad (Budget)	%	98.9	98	98.9	97.2
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	585	528	732	741
Molino 2	Disponibilidad	%	97	98	97	98.3
	Disponibilidad (Budget)	%	96	97	97	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	645	720	680	701
Molino 4	Disponibilidad	%	93.5	98	99	97.3
	Disponibilidad (Budget)	%	94	97	98.9	97
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	485	560	650	645
Sistema de Bombeo 1	Disponibilidad	%	97	98	97	95.5
	Disponibilidad (Budget)	%	97.5	97.5	97.5	95
	Confiabilidad (MTBF)	Horas	524	655	531	394

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera en el gráfico 4.1, se muestra un desempeño de 1.8% por encima de la disponibilidad presupuesta por mantenimientos planeados. Para ambos casos, la confiabilidad está por encima del promedio de los tres últimos años.

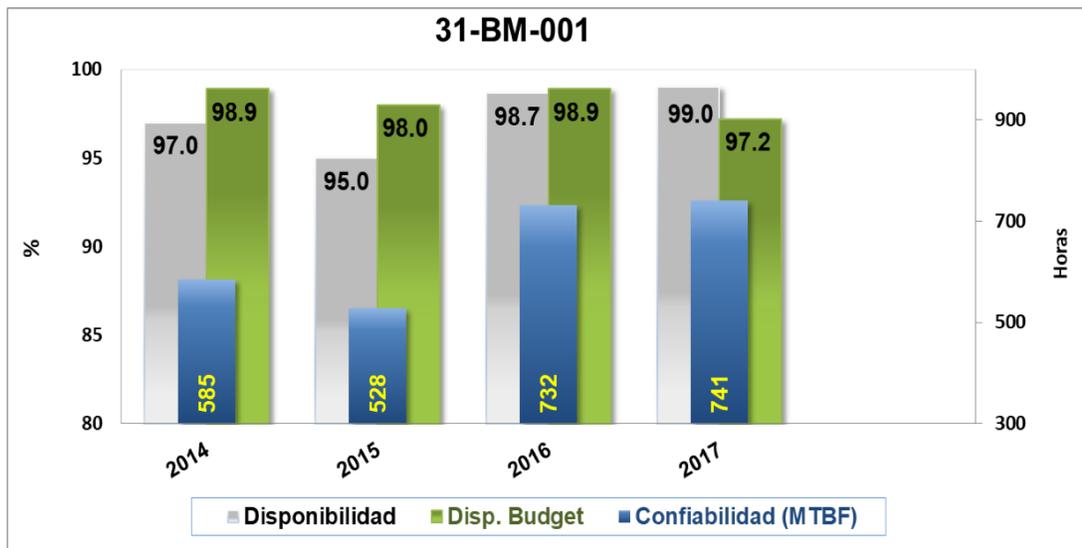
A continuación, los gráficos 4.1 y 4.2 muestran una clara evolución en el año 2017, donde se logra asegurar la disponibilidad presupuestada y la confiabilidad operacional de los equipos críticos, debido principalmente a que se evitaron paradas no planificadas por falta de repuestos, asegurando de esta manera la continuidad operativa.

Gráfico N°4.1: Disponibilidad real, disponibilidad Budget y confiabilidad de molino de bolas #4. Período 2014-2017.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°4.2: Disponibilidad real, disponibilidad Budget y confiabilidad de molino de bolas #1. Período 2014-2017.



Fuente: Elaboración propia.

A modo de resumen, en la tabla 4.15 se muestra el comportamiento de la disponibilidad real, comparada con la disponibilidad presupuestada y confiabilidad del molino de bolas #4 en el período 2014-2017, el cual es afectado por la detención no planificada por espera de repuestos el año 2014.

Para el año 2017 se muestra un alto desempeño, 0,3% por encima de la disponibilidad presupuestada.

Tabla N°4.15: Resumen con indicadores antes y después de la mejora.

	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ANTES	DESPUES
Variable Independiente	Herramientas de Confiabilidad Operacional	Una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan en forma sistemática, avanzadas metodologías de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. La Confiabilidad Operacional lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional (Durán, 2000)	Confiabilidad	MTBF	732 Horas	741 Horas
			Análisis de Riesgo Crítico	Probabilidad x Consecuencia	0	ALTA
			Tasa de Falla	1 /MTBF	0.001366	0.001366
			Disponibilidad	(Tiempo requerido – Tiempo de Parada del Equipo) / Tiempo Disponible	98.7%	99%
Variable Dependiente	Presupuesto de Capital de mantenimiento	La serie de inversiones que se realizan en los diferentes equipos e instalaciones con el fin tanto de mantener como de aumentar los niveles de la producción, o también, para mantener el funcionamiento de un negocio o un sistema particular (Amendola, y otros, 2016)	Capital Expenditure – Inversiones de Capital	US\$ Uso de repuestos comprados / US\$ Total de repuestos Presupuestados	74%	85.6%

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se analiza la situación inicial del ejercicio de elaboración del presupuesto de capital de mantenimiento, se logra identificar que los criterios utilizados para la compra de repuestos y equipos críticos eran ineficientes, ya que se basaba principalmente en la experiencia del personal. Esta práctica empírica de criterios técnicos generó pérdidas por lucro cesante los años 2014 y 2015. Llegando a representar el 58% del presupuesto anual del año 2017, debido a la indisponibilidad de los activos por la espera de repuestos.
- El modelamiento del proceso de optimización del presupuesto de componentes capitalizables se realizó empleando herramientas de confiabilidad operacional como; El análisis de criticidad, el análisis de confiabilidad y mediante una matriz de evaluación de riesgo crítico, basada en el impacto en la producción y la probabilidad de ocurrencia de fallas. Estas herramientas resultaron ser altamente eficientes y eficaces por la asertividad en la ocurrencia de fallas y la priorización en la compra de componentes críticos.
- En la evaluación y análisis de la situación posterior, se observa que el año 2017 se logra asegurar la disponibilidad presupuestada y la confiabilidad operacional de los equipos críticos, debido a que se evitaron paradas no planificadas por falta de repuestos, asegurando de esta manera la continuidad operativa. De igual manera, se registra un 85.6% de eficiencia de gasto del presupuesto de componentes capitalizables, resultando superior a los tres años anteriores.
- Para que un programa de mantenimiento predictivo tenga éxito se requiere:
 - Compromiso absoluto de la alta gerencia.
 - Buenos informes e historia de los equipos.
 - Personal dedicado.
 - Criticidad asignada y con seguimiento.
 - Un buen sistema apoyado por computadora.
 - Rutas de mantenimiento.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que el jefe del área de Confiabilidad sea el dueño del proceso de elaboración del presupuesto, y además involucre al área de finanzas a fin de que las necesidades de compra de activos de mantenimiento sean entendidas en su real magnitud, con el objetivo único de negocio, el cual es asegurar la continuidad de la operación.
- Es imperativo que el jefe de planeamiento exija una buena base datos de fallas y de condición de los equipos. Ya que ambas fuentes de información, suministran la materia prima para un proceso eficiente y efectivo de elaboración del presupuesto.
- Se incorporan otras técnicas predictivas de manera que exista un apoyo al análisis de vibración que permita identificar con mayor facilidad las fallas en los equipos.
- En la investigación se ha considerado que la falta de repuestos puede ser satisfecha solo con la compra planificada de los componentes y el requerimiento de urgencia al proveedor. Sin embargo, debido a operaciones similares en Perú y Sudamérica, la falta de repuestos también puede ser cubierta con el préstamo de otras empresas. Por ello, se recomienda que mediante el área de logística se pueda prever este tipo de contingencias.
- En el presente proyecto y desarrollo de modelo, se han considerado tres herramientas de confiabilidad, en el futuro, cuando se disponga de mayor información, el área de Confiabilidad debería considerar el análisis de modos y efectos de falla (AMEF). Con el objetivo de prevenir fallas que se podrían generar más adelante, y no solo tener referencia histórica.
- Se recomienda a la Gerencia de Mantenimiento formalizar el modelo de elaboración del presupuesto de capital, mediante una directiva de distintas especialidades, para la ejecución sostenida y sistemática en los ejercicios presupuestales anuales, tanto a nivel interno como a nivel corporativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Amendola, L., Tibaire, A., Depool, M., Castillo, M., Borrell, L., & Sanchez, A. (2016). Impacto del CAPEX y OPEX en la Gestión de Activos. Impact of capex and opex asset management (pág. 252). Cartagena: Adventure Works.
- [2] Barreto, D. (2015). Modelos de Control de Inventarios para la Reducción de Costos de Repuestos de Mantenimiento en Taladros de Perforación OffShore en la Provincia de Tumbes. Lima: Universidad -nacional de Ingeniería.
- [3] Johnston, M. (2017). Cómo seleccionar la estrategia de mantenimiento adecuada. UP TIME MAGAZINE, 16-21.
- [4] Huerta, R. (14 de Agosto de 2018). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. Obtenido de clubdemantenimiento.com: http://www.mantenimientoplanificado.com/Articulos%20gesti%C3%B3n%20mantenimiento_archivos/de%20confiabilidad/ANALISIS%20DE%20CRITICIDAD.pdf
- [5] Barreto, D. (2015). Modelos de Control de Inventarios para la Reducción de Costos de Repuestos de Mantenimiento en Taladros de Perforación OffShore en la Provincia de Tumbes. Lima: Universidad -nacional de Ingeniería.
- [6] Arata, A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Santiago de Chile: RIL.
- [7] Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Enfoque de estimación de piezas de repuesto basado en el entorno de operación y confiabilidad: A case study in Kiruna Mine, Sweden. Quality in Maintenance Engineering, 169-186.

ANEXO A

TABLA DE CRITICIDAD DE EQUIPOS PLANTA CONCENTRADORA

Tabla de Criticidad de Equipos Planta Concentradora									
ID	TAG de equipo	Descripción	FF	CONSECUENCIA DE FALLA (CF)					FF*CI
			Frecuencia de Falla	Tiempo Prom. Reparación	Impacto Operacional	Impacto en Seguridad	Costo del repuest	Llegada al almacen	Indice de Criticida
1	31-BM-002	Molino de Bolas 2	3	3	3	1	4	4	45.0
2	31-PS-002	Sistema de Bombeo 2	3	1	3	1	2	3	30.0
3	31-BM-003	Molino de Bolas 3	2	2	3	1	4	4	28.0
4	31-CB-001	Faja 1	2	3	4	1	3	2	26.0
5	31-PS-001	Sistema de Bombeo 1	2	1	3	1	2	3	20.0
6	31-CP-007	Chancadora 1	1	3	4	1	4	4	16.0
7	31-BM-001	Molino de Bolas 1	1	1	3	1	4	4	13.0
8	31-BM-004	Molino de Bolas 4	1	1	3	1	4	4	13.0
9	31-CB-021	Faja 2A	1	3	3	1	3	2	12.0
10	31-CB-022	Faja 2B	1	3	3	1	3	2	12.0
11	31-AF-001	Alimentador de Placas 1	1	1	2	1	2	2	8.0
12	31-AF-002	Alimentador de Placas 0	1	1	2	1	2	2	8.0
13	33-CLS-001	Ciclon 1	0.7	2	1	1	2	1	4.9
14	33-CLS-002	Ciclon 2	0.7	2	1	1	2	1	4.9
15	33-CLS-003	Ciclon 3	0.7	2	1	1	2	1	4.9
16	33-CLS-004	Ciclon 4	0.7	2	1	1	2	1	4.9
17	31-CB-032	Faja 3B	1	2	1	0.5	2	2	7.5
18	31-CB-031	Faja 3A	1	2	1	0.5	2	2	7.5
19	31-CB-040	Faja 4	0.7	2	1	0.5	2	2	5.3
20	31-CB-050	Faja 5	0.6	2	1	0.5	2	2	4.5
21	32-CR-001A	Celda Rougher Fila A1	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
22	32-CR-002A	Celda Rougher Fila A2	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
23	32-CR-003A	Celda Rougher Fila A3	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
24	32-CR-004A	Celda Rougher Fila A4	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
25	32-CR-005A	Celda Rougher Fila A5	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
27	32-CR-001B	Celda Rougher Fila B1	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
28	32-CR-002B	Celda Rougher Fila B2	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
29	32-CR-003B	Celda Rougher Fila B3	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
30	32-CR-004B	Celda Rougher Fila B4	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
31	32-CR-005B	Celda Rougher Fila B5	0.6	3	0.25	0.1	1.5	1.5	3.8
32	32-CR-006B	Celda Rougher Fila B6	0.7	3	0.25	0.1	1.5	1.5	4.4
33	33-PS-010A	Sist. Alim. Ciclones 10A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
34	33-PS-011A	Sist. Alim. Ciclones 11A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
35	33-PS-020A	Sist. Alim. Ciclones 20A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
36	33-PS-021A	Sist. Alim. Ciclones 21A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
37	33-PS-030A	Sist. Alim. Ciclones 30A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
38	33-PS-031A	Sist. Alim. Ciclones 31A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
39	33-PS-040A	Sist. Alim. Ciclones 40A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
40	33-PS-041A	Sist. Alim. Ciclones 41A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
41	33-PS-050A	Sist. Alim. Ciclones 50A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
42	33-PS-051A	Sist. Alim. Ciclones 51A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
43	33-PS-060A	Sist. Alim. Ciclones 60A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
44	33-PS-061A	Sist. Alim. Ciclones 61A	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
45	33-PS-010B	Sist. Alim. Ciclones 10B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
46	33-PS-011B	Sist. Alim. Ciclones 11B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
47	33-PS-020B	Sist. Alim. Ciclones 20B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
48	33-PS-021B	Sist. Alim. Ciclones 21B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
49	33-PS-030B	Sist. Alim. Ciclones 30B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7

ID	TAG de equipo	Descripción	FF	CONCECUENCIA DE FALLA (CF)					FF°C	
			Frecuencia de Falla	Tiempo Prom. Reparación	Impacto Operacional	Impacto en Seguridad	Costo del repuest	Llegada al almacen	Índice de Crítica	
50	33-PS-031B	Sist. Alim. Ciclones 31B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
51	33-PS-040B	Sist. Alim. Ciclones 40B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
52	33-PS-041B	Sist. Alim. Ciclones 41B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
53	33-PS-050B	Sist. Alim. Ciclones 50B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
54	33-PS-051B	Sist. Alim. Ciclones 51B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
55	33-PS-060B	Sist. Alim. Ciclones 60B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
56	33-PS-061B	Sist. Alim. Ciclones 61B	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7
57	33-CLS-01A	Ciclón A1	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
58	33-CLS-02A	Ciclón A2	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
59	33-CLS-03A	Ciclón A3	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
60	33-CLS-04A	Ciclón A4	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
61	33-CLS-05A	Ciclón A5	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
62	33-CLS-06A	Ciclón A6	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
63	33-CLS-01B	Ciclón B1	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
64	33-CLS-02B	Ciclón B2	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
65	33-CLS-03B	Ciclón B3	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
66	33-CLS-04B	Ciclón B4	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
67	33-CLS-05B	Ciclón B5	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
68	33-CLS-06B	Ciclón B6	0.6	1	0.5	0.5	1.5	1	2.7	2.7
69	32-PS-001A	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 1 A	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
70	32-PS-002A	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 2 A	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
71	32-PS-001B	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 1 B	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
72	32-PS-002B	Sist. Bombeo Alim. Celda Columna 2 B	0.5	2	0.5	1	2	1	3.3	3.3
73	33-ACC-001A	Agitador Celda Columna A	0.2	2	0.5	1	1	1	1.1	1.1
74	33-ACC-001B	Agitador Celda Columna B	0.2	2	0.5	1	1	1	1.1	1.1
75	33-CC-001	Sist. De Bombeo Colector Concentrado 1	1	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	1.7	1.7
76	33-CC-002	Sist. De Bombeo Colector Concentrado 2	1	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	1.7	1.7
77	33-EC-001	Sist. Espesador Concentrado 1	1	3	2	1	2	2	10.0	10.0
78	33-PDC-001	Sist. De Bombeo Concentrado 1	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
79	33-PDC-002	Sist. De Bombeo Concentrado 2	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
80	33-PFC-001	Sist. Bombeo Alim. Concentrado 1	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
81	33-PFC-002	Sist. Bombeo Alim. Concentrado 2	1	1	1	0.5	1	1	4.5	4.5
82	33-FIL-002	Sist. Agitador de Concentrado a Filtros	1	3	4	1	2	2	12.0	12.0
83	33-PS-001A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 1A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
84	33-PS-001B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 1B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
85	33-PS-002A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 2A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
86	33-PS-002B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 2B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
87	33-PS-003A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 3A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
88	33-PS-003B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 3B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
89	33-PS-004A	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 4A	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
90	33-PS-004B	Sist. De Bombeo de alim. A Filtro 4B	1	2	1	2	1	0.5	6.5	6.5
91	33-FP-001	Filtro de Concentrado 1	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
92	33-FP-002	Filtro de Concentrado 2	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
93	33-FP-003	Filtro de Concentrado 3	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
94	33-FP-004	Filtro de Concentrado 4	1	2	2	2	2	2	10.0	10.0
95	33-FA-005	Sistema de Liberación de Aire 1	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
96	33-FA-004	Sistema de Liberación de Aire 2	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
97	33-FA-003	Sistema de Liberación de Aire 3	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
98	33-FA-004	Sistema de Liberación de Aire 4	0.2	0.1	0.25	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
99	33-FIL-001	Sist. Agitador de Filtrado 1	1	3	3	3	2	1	12.0	12.0
100	35-PS-001	Sist. Bombeo Transferencia 1	2	1	1	1	0.5	0.5	8.0	8.0
101	35-PS-002	Sist. Bombeo Transferencia 2	2	1	1	1	0.5	0.5	8.0	8.0
102	33-CS-001	Sist. Clarificador 1	1	3	3	3	2	1	12.0	12.0
103	33-PSC-001	Sist. de Bombeo descarga de clarificador 1	1	1	0.5	1	1	1	4.5	4.5
104	33-PSC-002	Sist. de Bombeo descarga de clarificador 2	1	1	0.5	1	1	1	4.5	4.5
105	34-EP-001	Sist. Mecanismo espesador Pasta 1	1	2	3	2	1	1	9.0	9.0
106	34-PS-001	Sist. De Bombeo de Pasta 1	1	1	2	3	2	0.5	8.5	8.5
107	34-PS-002	Sist. De Bombeo de Pasta 2	1	1	2	3	2	0.5	8.5	8.5
108	32-AC-001	Sist. Agitador Almacenamiento Concentrado	0.5	3	3	0.5	3	2	5.8	5.8
109	35-CPS-001	Compresor 1	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
110	35-CPS-002	Compresor 2	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
111	35-CPS-003	Compresor 3	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
112	35-CPS-004	Compresor 4	0.5	2	0.5	0.5	2	1	3.0	3.0
113	34-LS-001	Tomillo alimentador de Cal	0.5	1	0.5	0.5	2	0.5	2.3	2.3
114	35-PF-001	Sist. de Flocculante 1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1.5	1.5
115	35-PF-002	Sist. de Flocculante 2	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1.5	1.5
116	35-PF-003	Sist. de Flocculante 3	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1.5	1.5
117	36-PS-002	Sistem. Sellado de agua 1	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7
118	36-PS-002	Sistem. Sellado de agua 2	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7
119	35-PS-003	Sistema de Bombeo Relaves 1	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7
120	35-PS-002	Sistema de Bombeo Relaves 2	0.5	0.8	0.5	0.5	1	0.5	1.7	1.7

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B

EFICIENCIA DE GASTO DE COMPONENTES CAPITALIZABLES PRESUPUESTADO

ID	TAG	Descripción de Componente	Año			
			2014	2015	2016	2017
1	31-BM-MT-001	Motor Eléctrico Sist. Bombeo de Ciclones	\$56,800.00	-	\$56,800.00	-
2	31-BM-BO-052	Bobinas de Molino de Bolas	\$200,500.00	-	-	-
3	31-AF-SH-011	Motor Hidráulico de Alimentador de Placas	-	\$171,000.00	-	-
4	31-AF-SH-012	Bomba Hidráulica de Alimentador de Placas	-	\$97,000.00	-	-
5	31-AF-SM-001	Kit de Placas y Sprocket	-	-	\$40,130.00	-
6	31-PS-VO-001	Carcaza de Bomba Ciclones	-	-	\$46,800.00	\$46,800.00
7	31-PS-HO-001	Alojamiento de Rodamientos de Bomba Ciclones	-	\$25,800.00	\$25,800.00	-
8	33-EC-SH-005	Sist. Hidráulico Espesador Concentrado	-	-	-	\$130,230.00
9	31-BM-SH-005	Tapa de descarga de Molino de Bolas	-	-	-	\$680,000.00
10	31-CP-MS-001	Eje Principal de Chancadora Primaria	-	-	\$245,210.00	-
11	31-CP-MS-007	Kit de Elementos de desgaste Ch. Primaria	-	-	\$155,060.00	-
12	33-FP-SH-001	Kit de Placas de Filtro de Concentrado	-	\$145,029.00	-	-
13	31-BM-SH-015	Bearing Pads - Discharge	-	-	-	\$216,800.00
14	31-CP-SH-001	HydroSet de Chancadora Primaria	-	\$126,800.00	-	-
15	33-CLS-CC-030	Kit de Nido de Ciclones	-	-	\$85,800.00	-
16	31-BM-SH-025	KIT Bearing Pads - Discharge	\$261,000.00	-	\$261,000.00	-
17	31-CB-RE-001	Caja Reductora de Faja	\$85,000.00	-	-	-
18	31-CB-RE-041	Caja Reductora de Faja	\$37,000.00	-	-	-
19	33-FIL-SM-001	Sist. Mecánico de Agitador de Filtrado	-	\$173,271.00	-	-
20	32-AC-SH-011	Sist. Hidráulico Agitador Alm. Concentrado	\$112,000.00	-	-	-
GASTO REAL (Utilización de Componente)			\$752,300.00	\$738,900.00	\$916,600.00	\$1,027,030.00
PRESUPUESTO DE COMPONENTES CAPEX DE MANTENIMIENTO			\$1,000,000.00	\$1,100,000.00	\$1,150,000.00	\$1,200,000.00
EFICIENCIA DE GASTO - CAPEX (%)			75.2	67.2	79.7	85.6

Fuente: Elaboración propia.

