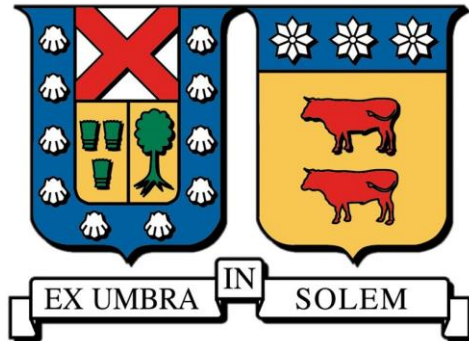


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA



**PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD PARA
BATERÍA DE HIDROCICLONES**

Memoria de Titulación Presentada por
JAVIER ANDRÉS ARANCIBIA NÚÑEZ

Como Requisito Parcial para Optar al Título de
Ingeniería en Mantenimiento Industrial con Licenciatura en Ingeniería

Profesor Guía

Ing. Civil. Industrial Eduardo Antonio Vidal Páez

Enero de 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: **Propuesta de plan de mantenimiento basado en confiabilidad para batería de hidrociclones**

Nombre del candidato(a): **Javier Andrés Arancibia Núñez**

Carrera / Grado: **Ingeniería en mantenimiento con licenciatura en ingeniería**

Campus: **Viña del Mar** Departamento: **Mecánica**

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Eduardo Antonio Vidal Páez**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 02-06-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02-06-2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

La confiabilidad y disponibilidad de los equipos críticos son factores determinantes para la continuidad operacional en plantas de procesamiento minero. En este contexto, la batería de hidrociclones utilizada en la planta de clasificación E.C.M.E. de Anglo American Sur cumple un rol fundamental en la separación de arenas y lamas para la disposición de relaves y la construcción del muro del tranque. Sin embargo, el sistema ha presentado una disminución progresiva en su desempeño operacional, reflejada en pérdidas de presión, aumento del desgaste en componentes críticos y un incremento de las detenciones no planificadas.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un plan de mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM II), apoyado en el análisis F.M.E.C.A., con el fin de mejorar los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operativa de la batería de hidrociclones. Para ello, se realizó una caracterización técnica del proceso de clasificación, identificando las funciones principales del sistema y los modos de falla más relevantes asociados al desgaste del ápex y el vortex, componentes que influyen directamente en la estabilidad de la presión de operación y en la calidad del producto clasificado.

A través de la aplicación del análisis de criticidad, se jerarquizaron los equipos del sistema de clasificación, determinando que la batería de hidrociclones constituye el activo de mayor impacto operacional. Posteriormente, mediante el F.M.E.C.A. se evaluaron los efectos, causas y consecuencias de los modos de falla, lo que permitió definir tareas de mantenimiento preventivo y predictivo orientadas a la detección temprana del desgaste, el control de parámetros operacionales y la reducción de fallas funcionales

Como complemento al análisis técnico, se desarrolló una evaluación de factibilidad técnico-económica considerando los costos de implementación del plan de mantenimiento y los beneficios asociados a la disminución de detenciones no programadas, optimización del consumo de hídrico y mejorar en la eficiencia del proceso de clasificación. Los resultados evidencian que la aplicación sistemática del enfoque propuesto permite no solo incrementar la confiabilidad del sistema, sino también generar un impacto positivo en la continuidad operacional y en la gestión de activos de la planta.

La integración de la metodología RCM II con herramientas de análisis de fallas y evaluación económica constituye una estrategia efectiva para fortalecer la gestión del mantenimiento en sistemas críticos de la industria minera, aportando una base técnica sólida para la toma de decisiones y la mejora continua de los procesos productivos.

Palabra clave: Plan de mantenimiento predictivo, criticidad de equipos.

Índice

Resumen	2
Índice	5
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas	11
Siglas y Símbologia	15
Introducción	17
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	19
Capítulo 1: Antecedentes Generales	20
1.1 Contexto Operacional	21
<i>1.1.1 Planta Los Bronces</i>	<i>22</i>
<i>1.1.2 Planta Las Tórtolas</i>	<i>23</i>
1.2 Descripción del Sistema de la Planta Clasificación	24
<i>1.2.1 Clasificación relaves</i>	<i>25</i>
<i>1.2.2 Disposición de Relave</i>	<i>29</i>
<i>1.2.3 Recuperación de Aguas</i>	<i>34</i>
1.3 Planteamiento de la Problemática	37
1.4 Análisis de Indicadores de la Planta E.C.M.E.	38
<i>1.4.1 Componentes del tranque</i>	<i>40</i>
<i>1.4.2 Reutilización del agua en el tranque</i>	<i>41</i>
<i>1.4.3 Vida útil del tranque</i>	<i>41</i>
<i>1.4.4 Indicadores de la batería de hidrociclones del último año</i>	<i>41</i>
1.5 Desempeño del Proceso	43

1.6 Síntesis del Diagnóstico de la Batería hidrociclones	44
Capítulo 2: Bases Teóricas de la Confiabilidad y el Mantenimiento Industrial	46
2.1 Problema Asociado al Equipo	46
2.2 Antecedentes del Hidrociclón	46
<i>2.2.1 El fenómeno del hidrociclón</i>	46
<i>2.2.2 Principio de funcionamiento de los hidrociclones</i>	47
2.3 Conjunto de la Batería del Hidrociclón	49
<i>2.3.1 Presión de los ciclones</i>	53
<i>2.3.2 Parámetros de operación bajo efectos del desgaste</i>	54
<i>2.3.3 Propuesta de la problemática</i>	56
2.4 Mantenimiento Industrial	57
2.5 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad	58
<i>2.5.1 Enfoque RCM II y criterios SAE JA1011/JA1012</i>	58
<i>2.5.2 Las 7 preguntas</i>	59
<i>2.5.3 Factores de evaluación, comparación y matriz de criticidad</i>	61
<i>2.5.4 Análisis de modo de falla</i>	66
<i>2.5.5 Tabla F.M.E.C.A.</i>	66
<i>2.5.5 Efecto y severidad de los modos de falla</i>	66
2.6 Diagrama De Decisiones R.C.M. II	67
<i>2.6.1 Actividades de mantenimiento</i>	69
<i>2.6.2 Resultados de F.M.E.C.A fallas totales</i>	70
<i>2.6.3 Resultados de F.M.E.C.A fallas parciales</i>	71
2.7 SHA	72
<i>2.7.1 Presentación del gráfico SHA</i>	73
Capítulo 3: Propuesta de Plan de Mantenimiento Basado en RCM II y F.M.E.C.A.	76

3.1 Diagnóstico de los Modos de Falla mediante F.M.E.C.A. y Análisis SHA	77
3.2 Matriz R.C.M.	80
<i>3.2.1 Presentación PPM fallas totales</i>	80
<i>3.2.2 Presentación PPM fallas parciales</i>	81
3.3 Propuesta de Escenarios para Mejora	82
<i>3.3.1 Parámetros económicos y operacionales utilizados</i>	83
<i>3.3.2 Escenario 1</i>	84
<i>3.3.3 Escenario 2</i>	86
<i>3.3.4 Comparación de escenarios y ahorro proyectado</i>	89
<i>3.3.5 Evaluación de indicadores operacionales y mejora proyectada</i>	91
<i>3.3.6 Análisis cuantitativo de la batería de hidrociclones</i>	93
<i>3.3.7 Relación entre fallas y desempeño</i>	94
3.4 Propuesta Plan De Mantenimiento	95
3.5 El Impacto Técnico del Mantenimiento Predictivo en Beneficios Económicos	100
<i>3.5.1 Metodología económica</i>	101
<i>3.5.2 Costos de implementación</i>	102
<i>3.5.3 Estimación de beneficios anuales por reducción de fallas no planificadas</i>	113
3.6 Flujo De Caja	114
Conclusión y Recomendaciones	116
Referencia	120

Índice de Figuras

Figura 1.1	21
<i>Localización de las Plantas Los Bronces y Las Tórtolas</i>	21
Figura 1.2	22
<i>Esquema de la Planta Los Bronces y Las Tórtolas</i>	22
Figura 1.3	23
<i>Procesos la Planta las Tórtolas y Planta Clasifica</i>	23
Figura 1.4	24
<i>Diagrama de Flujo de la Planta Clasificación</i>	24
Figura 1.5	25
<i>Mapa Geográfico de la Planta Clasificación</i>	25
Figura 1.6	26
<i>Alimentación de Relave</i>	26
Figura 1.7	27
<i>Alimentación de Relave</i>	27
Figura 1.8	30
<i>Batería de Hidrociclón</i>	30
Figura 1.9	31
<i>Cajón de Arena</i>	31
Figura 1.10	32
<i>Cajón de Lamas</i>	32
Figura 1.11	33
<i>Impulsión y Distribución de Arena</i>	33
Figura 1.12	35

<i>Estanque Agua</i>	35
Figura 1.13	36
<i>Bomba Agua de Sello</i>	36
Figura 1.14	37
<i>Piscina de Agua Recuperada</i>	37
Figura 1.15	39
<i>Entradas y Salidas de los Hidrociclones</i>	39
Figura 1.16	40
<i>Composición del Muro y Tranque de la Minera</i>	40
Figura 2.1	49
<i>Batería de Hidrociclones</i>	49
Figura 2.2	50
<i>Ciclón</i>	50
Figura 2.3	51
<i>Hidrociclón</i>	51
Figura 2.4	52
<i>Recyclón</i>	52
Figura 2.5	52
<i>Ápex</i>	52
Figura 2.6	53
<i>Vortex</i>	53
Figura 2.7	54
<i>Caudal vs Presión</i>	54
Figura 2.9	55
<i>Descarga del Ápex</i>	55

Figura 2.10	56
<i>Clasificación sin Desgaste y con Desgaste</i>	56
Figura 2.11	68
<i>Diagrama de Decisiones de R.C.M.</i>	68
Figura 2.12	70
<i>F.M.E.C.A Fallas Totales</i>	70
Figura 2.13	71
<i>F.M.E.C.A Fallas Parciales</i>	71
Figura 2.14	72
<i>SHA</i>	72
Figura 2.15	73
<i>Matriz de Criticidad de Fallas del Sistema de batería Hidrociclones (SHA)</i>	73
Figura 3.1	80
<i>PPM Fallas Totales</i>	80
Figura 3.2	81
<i>PPM Fallas Parciales</i>	81
Figura 3.3	85
<i>Escenarios 1</i>	85
Figura 3.4	88
<i>Escenarios 2</i>	88

Índice de Tablas

Tabla 1.1	26
Datos de Alimentación de Relave	26
Tabla 1.2	43
Indicadores de Confiabilidad y Disponibilidad Actual	43
Tabla 1.3	44
Datos de Planta E.C.M.E	44
Tabla 1.4	45
Datos de Rendimiento del Mantenimiento	45
Tabla 2.1	62
Escala de Frecuencia	62
Tabla 2.2	62
Frecuencia de Falla (FF)	62
Tabla 2.3	63
Impacto Operacional (IO)	63
Tabla 2.4	63
Flexibilidad Operacional (FO)	63
Tabla 2.5	63
Costos de Mantenimiento (CM)	63
Tabla 2.6	64
Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)	64
Tabla 2.7	64
Repuestos en Stock (RS)	64
Tabla 2.8	64
Jerarquización Planta Clasificación E.C.M.E	64

Tabla 2.9	66
Funciones principales del equipo	66
Tabla 3.1	83
Sueldos de las Especialidades	83
Tabla 3.2	83
Valor de Producción	83
Tabla 3.3	90
Valores de los Modos de Fallas del Escenario 1	90
Tabla 3.4	90
Valor Total del Ahorro del Escenario 1	90
Tabla 3.5	90
Valores de los Modos de Fallas del Escenario 2	90
Tabla 3.6	90
Valor Total del Ahorro del Escenario 2	90
Tabla 3.7	92
Impactos comparativos del escenario 0 y del escenario 1	92
Priorización de actividades de mantenimiento basada en criticidad	95
Tabla 3.9	96
Propuesta del Plan de Mantenimiento Semanal	96
Tabla 3.10	97
Propuesta del Plan de Mantenimiento Mensual MP - MPD	97
Tabla 3-11	95
Propuesta del Plan de Mantenimiento Trimestral MPD-ADV	95
Tabla 3.12	96
Propuesta del Plan de Mantenimiento Semestral MPD-ADV	96

Tabla 3.13	97
Propuesta del Plan de Mantenimiento Anual	97
Tabla 3.14	98
Propuesta del Plan de Mantenimiento con Actividades del Overhaul	98
Tabla 3.14	99
Continuación Propuesta del Plan de Mantenimiento Actividades del Overhaul	99
Tabla 3.15	103
Costos de Capacitación	103
Tabla 3.16	104
Costos de Herramientas e Instrumentación	104
Tabla 3.17	105
Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Rutina	105
Tabla 3.18	106
Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Mensual	106
Tabla 3.19	107
Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Trimestral	107
Tabla 3.20	108
Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Anual	108
Tabla 3.21	109
Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Overhaul	109
Tabla 3.20	110
Continuación Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Overhaul	110
Tabla 3.21	111
Costos de Repuestos del Hidrociclón	111
Tabla 3.22	111

Costos de Repuestos Estructurales	111
Tabla 3.23	112
Costos de Repuestos de la Batería de Hidrociclón	112
Tabla 3.24	112
Costos Totales de la Inversión	112
Tabla 3.25	113
Estimaciones al Impacto de Producción Implementando el Escenario 1	113
Tabla 3.26	114
Flujo de Caja del Escenario 0	114
Tabla 3.27	115
Flujo de Caja del Escenario 1	115

Siglas y Símbología

Siglas

R.C.M.: Reliability Centred Maintenance.

F.M.E.C.A.: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

E.C.M.E.: Extracción de ciclones muro este.

SAE: Society of Automotive Engineers.

CP: Concentración en peso.

M.S.N.M.: Metros sobre el nivel del mar.

VAN: Valor actual neto.

TIR: Tasa Interna de Retorno.

PRI: Período de recuperación de la inversión.

AAS: Anglo American Sur.

VDF: Variador de frecuencia.

HP: Horse power.

PSI: Pounds-force per square inch.

VT: Visual test.

ASME: American Society of Mechanical Engineers.

UT: Ultrasound test.

UF: Unidad de fomento.

MTBF

MTTR

Fd: Fuerza de arrastre.

d: Diámetro de la partícula.

μ : Viscosidad del fluido.

V_r : Velocidad radial.

F_c : Fuerza centrífuga.

d : Diámetro de la partícula.

P_s : Densidad de sólidos.

P : Densidad del fluido.

V_t : Velocidad tangencial.

Λ : Tasa de fallas

$R(t)$: Confiabilidad

A : Disponibilidad

e : Euler

t : Tiempo

USD: United States Dollar

HDPE: High density polyethylene pipe

PPM: Planned Preventive Maintenance

Simbología

l/min: Litros en minutos

t/d: Tonelada por día

t/h: Tonelada por hora

m^3 : Metros cúbicos

kt/d: kilo tonelada por día

m: Metros

Introducción

En la actualidad, las industrias buscan incorporar nuevas tecnologías y metodologías que les permitan optimizar sus recursos y mejorar la eficiencia operativa. En este contexto, el mantenimiento predictivo (PdM) se presenta como una solución estratégica, ya que “se basa en el monitoreo continuo del estado del equipo mediante datos en tiempo real (vibración, temperatura, sonido, lubricación, etc.), junto con análisis avanzados, para anticipar fallas y programar intervenciones en el momento más adecuado. Su objetivo es maximizar la confiabilidad y la disponibilidad operativa, reduciendo costos por paradas imprevistas e ineficiencias” (IBM, s.f.).

Por lo cual el mantenimiento de las maquinarias utilizadas en los procesos productivos es un aspecto fundamental no solo para las grandes industrias, sino también para las microempresas que están comenzando en el sector. Sin importar el tamaño de la empresa, es crucial reconocer la importancia de mantener los equipos operativos y optimizar su rendimiento. Según Olarte et al. (2010), "el objetivo general del mantenimiento industrial es planificar, programar y controlar todas las actividades orientadas a garantizar el correcto funcionamiento de los equipos en los procesos de producción". Hoy por hoy se recomienda tener, “un conjunto de actividades y coordinación a través de las cuales una organización maneja en forma óptima sus activos, y su negocio principal, riesgos y gastos, a lo largo de su ciclo de vida con el fin de lograr sus objetivos estratégicos” (PAS-55:2004). Para obtener un resultado anticipado de los futuros problemas que presentaría el equipo, ahorrando pérdidas económicas que pueden llegar a ser muy críticas.

Por esta razón, la implementación de un mantenimiento predictivo se enfoca en la batería de hidrociclones para llevar a cabo actividades programadas basadas en el análisis previo de posibles fallas críticas. Este enfoque se apoya en la ejecución de actividades predictivas y preventivas como por ejemplo (vibración, temperatura, lubricación, ultrasonido, mediciones de espesores) recopilación de datos y la realización de inspecciones periódicas a la maquinaria, con el fin de anticiparse a fallos antes de que ocurran.

En este caso particular, el funcionamiento óptimo del sistema depende de la presión interna que se ejerce en el cuerpo del equipo; una disminución en esta presión podría provocar una clasificación incorrecta del producto. Para detectar este tipo de anomalías a tiempo, es fundamental observar el comportamiento de las maquinarias a lo largo del tiempo, registrar cualquier desviación en su funcionamiento y aplicar mantenimiento de forma estratégica, basado en evidencia y diagnóstico técnico.

Anglo American Sur opera la mina Los Bronces, ubicada en Colina a 3.500 msnm, dedicada principalmente a la extracción de cobre. En esta faena se realizan procesos de chancado y molienda que generan pulpa, la cual es transportada a través de mineroductos hasta la planta Las Tórtolas. Allí se lleva a cabo el proceso de flotación para recuperar cobre y molibdeno, generando como subproducto relaves, los que son enviados a distintos puntos de disposición para alimentar los tranques.

La planta de clasificación cuenta principalmente con baterías de hidrociclones, cuya función es separar el material y suministrar las arenas utilizadas en la construcción del Muro Este del tranque. Sin embargo, este sistema ha presentado diversas fallas, lo que ha generado una disminución en su disponibilidad y confiabilidad.

Por ello, se llevará a cabo un análisis F.M.E.C.A. para identificar las causas raíz de cada una de las fallas y, a partir de ello, diseñar un plan de mantenimiento que incorpore herramientas de confiabilidad y estrategias de mantenimiento predictivo. Asimismo, se evaluará la factibilidad técnico-económica de la implementación, con el fin de asegurar la continuidad operacional y optimizar la gestión de los equipos.

Objetivo General

Desarrollar un plan de mantenimiento para la batería de hidrociclones, basado en la metodología RCM II, que permita incrementar la confiabilidad y la disponibilidad del sistema.

Objetivos Específicos

1. Analizar el funcionamiento de la batería de hidrociclones mediante datos operacionales, indicadores de desempeño y antecedentes técnicos de la empresa, con el fin de identificar los modos de falla críticos que afectan la confiabilidad del sistema y establecer la base para la aplicación del análisis RCM II y FMECA.

2. Aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM II), mediante el análisis FMECA, sobre los modos de falla identificados, con el fin de definir estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo orientadas a mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

3. Evaluar la factibilidad técnico-económica del plan de mantenimiento propuesto mediante indicadores financieros como VAN, TIR y PRI, con el fin de cuantificar el impacto económico de su implementación y validar la viabilidad del plan desarrollado.

Alcance

El trabajo se centra en el análisis de la batería de hidrociclones de la planta E.C.M.E. de Anglo American Sur, aplicando la metodología RCM II apoyada en F.M.E.C.A. para identificar y priorizar modos de falla y proponer tareas de mantenimiento. Asimismo, se evalúa la factibilidad técnico-económica del plan propuesto, excluyéndose modificaciones al proceso y su implementación.

Capítulo 1: Antecedentes Generales

1.1 Contexto Operacional

Anglo American Sur (AAS) es una compañía dedicada a extraer, procesar y comercializar materias primas a granel y las transforma en metales de interés como es el cobre, diamantes, platinos, níquel, mineral de hierro y carbón.

En Chile ha operado desde 1980, Posee y opera cinco divisiones: Mantos Copper, El Soldado, Fundición Chagres, Doña Inés de Collahuasi y Los Bronces.

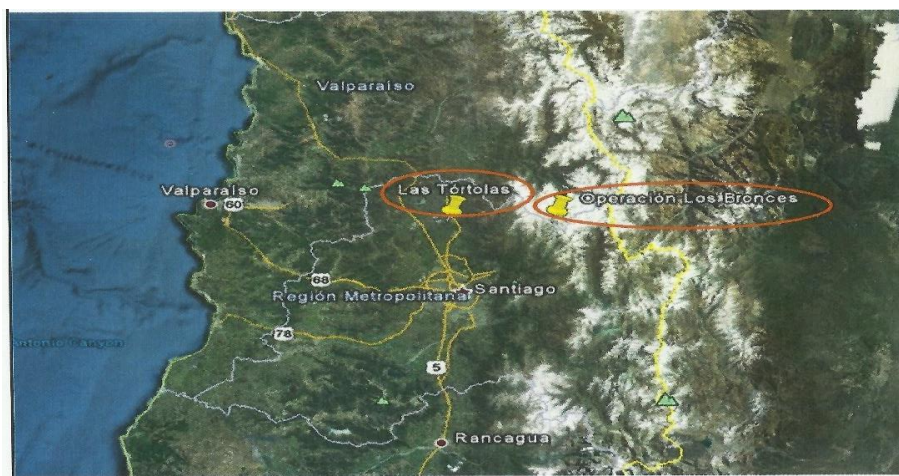
Los Bronces poseen dos zonas de operaciones:

- Mina Los Bronces
- Planta Las Tórtolas

Como se muestra en la Figura 1.1, la operación de Anglo American Sur se distribuye entre las plantas Los Bronces y Las Tórtolas.

Figura 1.1

Localización de las Plantas Los Bronces y Las Tórtolas



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

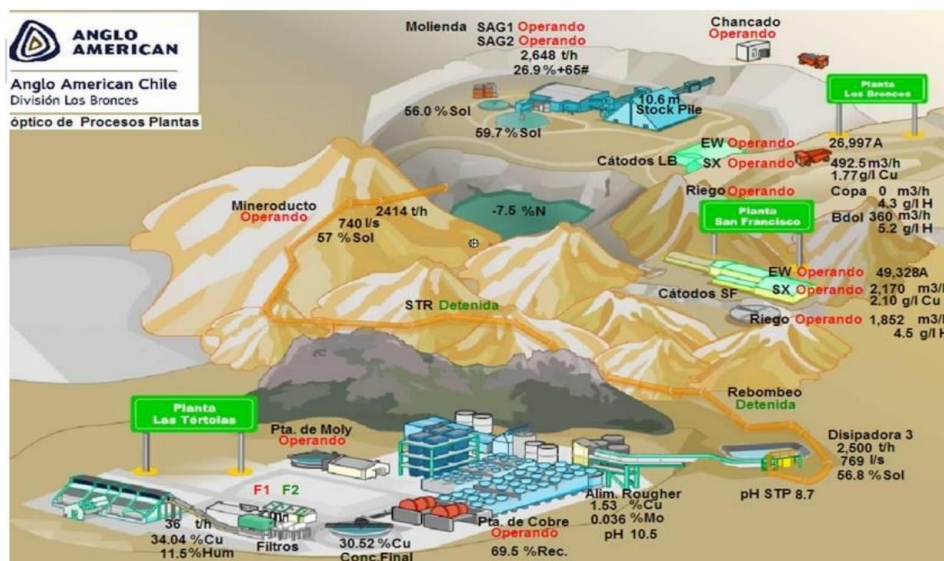
1.1.1 Planta Los Bronces

Los Bronces es una mina de cobre a cielo abierto, que se ubica a 3.500 (m.s.n.m.) en zona cordillerana, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago de Chile. Sus productos son el concentrado de cobre, molibdeno y cátodos de cobre.

El mineral extraído de esta mina (Cobre y Molibdeno), es sometido a procesos de molienda y lixiviación para la producción de cátodos de cobre mediante electro obtención. Por otro lado, el concentrado de pulpa que es transportado a través de un minera ducto hacia la planta concentradora (flotación convencional) Las Tórtolas (52 Km de distancia).

Figura 1.2

Esquema de la Planta Los Bronces y Las Tórtolas



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

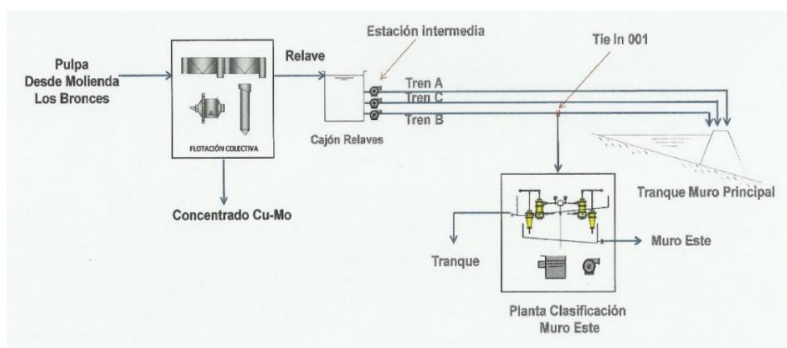
1.1.2 Planta Las Tórtolas

La planta Las Tórtolas está ubicada a 40 Km al norte de Santiago, en la comuna de Colina, y a 850 (m.s.n.m.), principalmente procesa el Cobre y Molibdeno en plantas de flotación de concentrado, los cuales son extraídos desde la minera Anglo American Sur, mina Los Bronces.

Una vez completado el proceso en la planta Las Tórtolas obtendremos concentrado de Cu-Mo y Relave como se aprecia en la Figura 1.2 presenta el esquema general de las plantas Los Bronces y Las Tórtolas y su relación dentro del proceso productivo. El Relave será transportado por bombas impulsoras con destino al Tranque Muro Principal. Para la formación del Muro Este se ha construido la planta de clasificación de baterías de hidrociclones que permiten clasificar los relaves en fracciones gruesas (arena) y fina (lamas) dotados por 4 hidrociclones Cavex 500, como se observa en la Figura 1.3, el proceso integra la operación de la planta Las Tórtolas con la planta de clasificación.

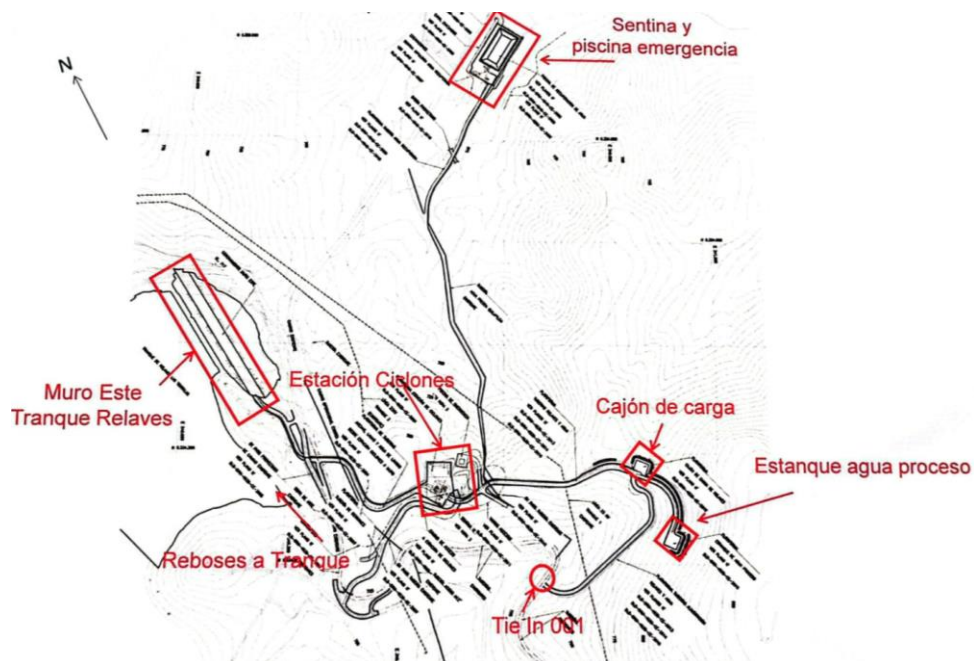
Figura 1.3

Procesos la Planta las Tórtolas y Planta Clasifica



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Figura 1.5

Mapa Geográfico de la Planta Clasificación

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

1.2.1 Clasificación relaves

La clasificación relaves se compone de dos unidades operativas tales como la línea de alimentación de relave y el cajón de carga.

La alimentación de relave al sistema se observa en la Figura 1.6, la planta Tie in 001 entrega relaves no espesados a una concentración en peso (C_p) de orden de 30%; por lo que los ciclones y toda la planta están diseñados para procesar relaves de esas características. El diseño también permite operar con un C_p de 55% tal como lo vemos en la Tabla 1.1 los datos de alimentación de relave considerados en la operación del sistema., para el caso en que eventualmente se ponga en servicio un espesador de relaves.

Figura 1.6

Alimentación de Relave

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Tabla 1.1

Datos de Alimentación de Relave

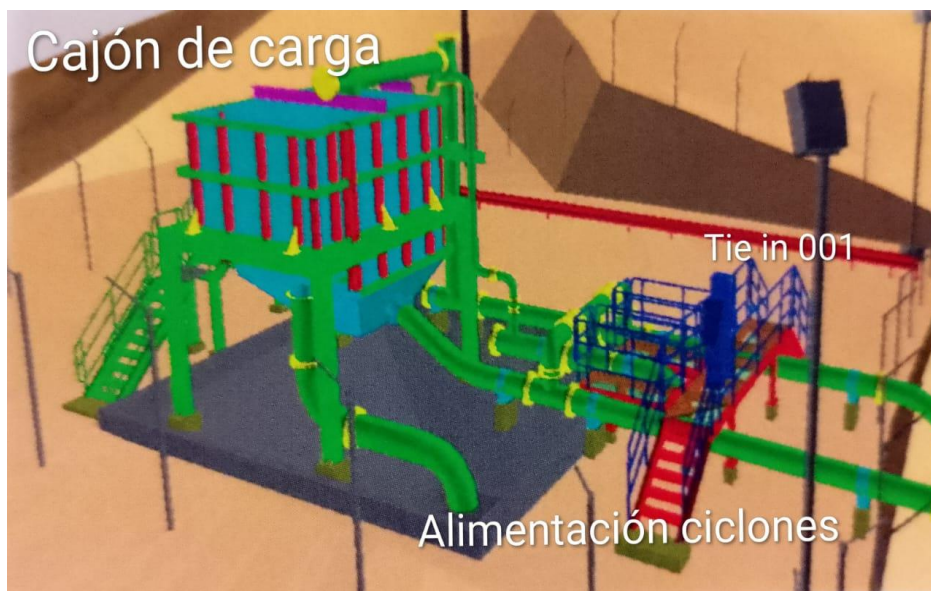
Parámetros	Cp. (30%)	Cp. (55%)
Alimentación relaves a cajón	7580 t/d	17000 t/d
Flujo relave fresco a ciclones	316 t/h	708 t/h
Producción arenas (objetivo)	1000 t/d	1510 t/d
Flujo instantáneo arenas	151 t/h	272 t/h

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

En la unidad operativa del cajón de carga, recibe pulpa de relaves desde línea 16"-C6-4830-TA-501 y descarga a través de la línea 16"-C6-4830-TA-502 que alimenta a los hidrociclones. Está ubicado en la plataforma (773,5 m.s.n.m.) para permitir carga hidráulica gravitacional para operar hidrociclones, sus dimensiones son de 3,9 m de altura, 3 m de ancho y 3 m de largo, con un volumen útil 5,5 m³, cuenta con dos reboses, uno lateral para descargar en forma permanente el relave de exceso hacia el foso colector de derrames, el segundo rebose de 0.75 m de altura y 2,2 m de ancho es para evacuar el total del flujo afluyente cuando la estación de ciclones no esté operativa, cuenta con una instrumentación de control de nivel, la cual mantiene estable el nivel del cajón de carga por medio de la válvula pinch LV-530, las líneas de pulpa asociadas al cajón cuentan con conexión a líneas de agua de lavado como se observarse en la Figura 1.7.

Figura 1.7

Alimentación de Relave



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

1.2.2 Disposición de Relave

En la disposición relaves se compone de las siguientes unidades operativas, batería hidrociclones, cajón de arenas, cajón de lamas, líneas impulsión (arenas y lamas).

La batería hidrociclón el objetivo de esta operación es producir arenas aptas para la construcción del muro (las lamas se descargan directo en tranque), recibe pulpa de relaves desde línea 16"-C6-4830-TA-502 y descarga arenas (underflow) a través de línea 16"-C6-4830-TA-508 y las lamas (overflow) a través de la línea 16"-C6-4830-TA-507. La razón arenas /lamas respecto a la alimentación de relaves: 38/62 (Cp: 55%), 42-48/58-52 (Cp: 30%), la alimentación de la batería se realiza en forma gravitacional asegurando la presión requerida. Presión de 21 Psi y 17 psi para relaves con Cp: 55% y 30% respectivamente, dicha presión se controla a través de la válvula pinch (16"-VP-560). Se agrega agua de dilución, tal que el contenido máximo de finos en la descarga de los hidrociclones (-200# Tyler) sea menor o igual a 15%, para esto, cada ciclón cuenta con válvula de mariposa y su respectiva válvula de retención. La batería dotada de cuatro hidrociclones CAVEX, provistos por VULCO, del tipo Recyclone como se muestra en la Figura 1.8.

Figura 1.8

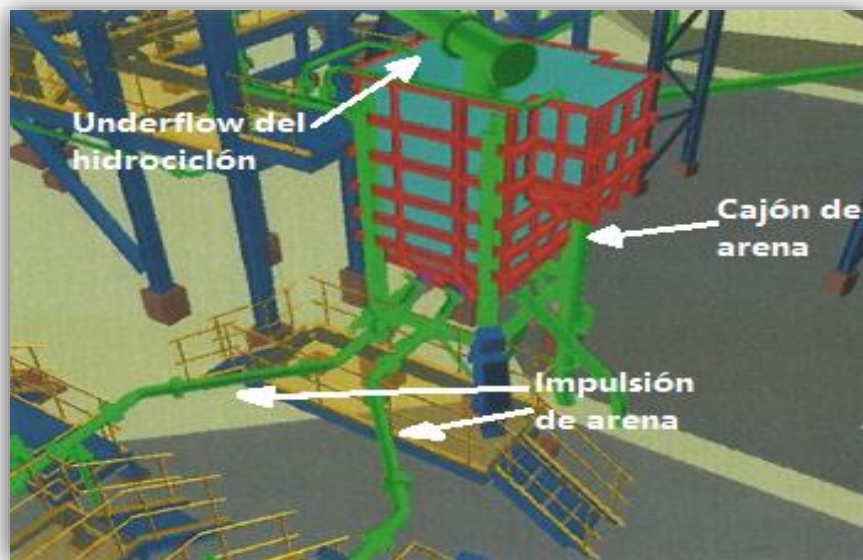
Batería de Hidrociclón

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

En la unidad operativa del cajón de arena como se presentan en la Figura 1.9, las arenas generadas en la clasificación (underflow) son conducidas por gravedad (linera de 20") hasta el cajón de arenas, las dimensiones del cajón son, 2,2 m de largo, 2,2 m de ancho y 3,7 m de altura y su volumen útil es de 4,4 m³, las arenas generadas tienen un Cp de 76%, por lo que son diluidas con agua hasta llegar a un Cp de 70%, para la impulsión de arenas al muro este, el cajón tiene dos tuberías de descarga de 6" c/u (tren 1/ tren 2), dispone de una cámara de rebose que canaliza los derrames al foso colector de derrames, para las mediciones se utiliza una instrumentación de transmisor de nivel ultrasónico 4830-LIT-151.

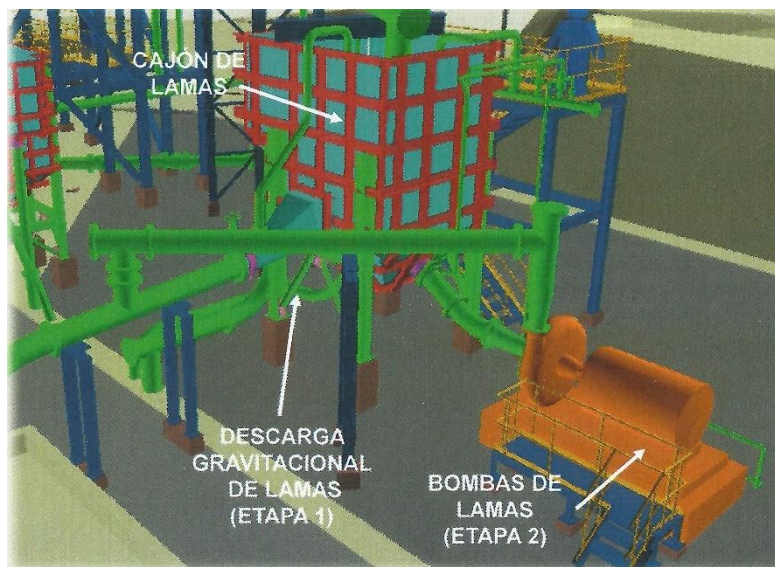
Figura 1.9

Cajón de Arena

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

La unidad operativa del cajón de laminas dentro del proceso se puede observar en la Figura 1.10, las laminas resultantes de la clasificación son conducidas desde el overflow de la batería por una línea de 20" hasta el cajón de laminas (20"-C6-4830-SL-507), desde este cajón, las laminas son conducidas hasta la cubeta del tranque, por una tubería (16"-C6-4830-SL-509), sus dimensiones son de 3 m de largo, 4 metros de ancho y 5,8 m de altura, u su volumen útil es de 29 m³. la impulsión de laminas a la cubeta del tranque se hará en forma gravitacional, y a partir del año 4 se realizará a través de una bomba centrífuga (75 Hp), dispone de una cámara de rebose que canaliza los derrames al foso colector de derrames, para las mediciones se utiliza una instrumentación de transmisor de nivel ultrasónico (4830-LIT-245).

Figura 1.10

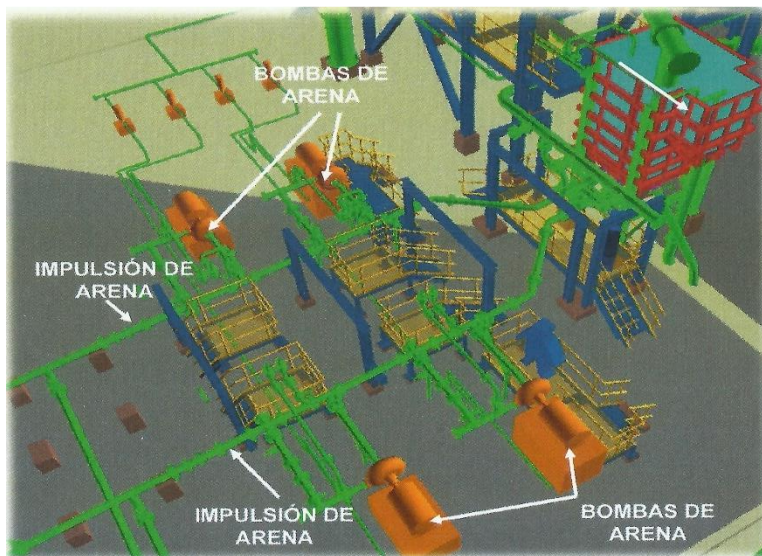
Cajón de Lamas

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

En la unidad operativa de impulsión y distribución de arenas como se representa en la Figura 1.11, el sistema de bombeo e impulsión de arena cuenta con 2 trenes paralelos provistos de 2 bombas centrífugas horizontal de 100 Hp c/u dispuestas en serie cada una (4830-PPS-005). Se considera por cada tren, un VDF que puede ser utilizado indistintamente entre ambas bombas de cada tren. En el muro, se considera un sistema de distribución mediante peinetas de HDPE PN20 DN=160 mm con orificios de 18 mm cada 4 m.

Lo que permite descargar un flujo aproximadamente de 1 kt/d, cada bomba tiene conexión al agua de sello, en cada línea hay un punto de inyección del agua de lavado (6”), en esta unidad operativa la instrumentación necesaria es: manómetro y un transmisor de presión en descarga c/bomba y además un flujómetro y un densímetro por cada tren.

Figura 1.11

Impulsión y Distribución de Arena

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

En la unidad operativa de impulsión y distribución de lamas, provienen del cajón de la operación serán descargadas en la cubeta del tranque, en forma gravitacional y, en el futuro, a través de la bomba centrífuga horizontal 4830-PPS-005, de 75 HP. La cañería de descarga principal de lamas, se considera en HDPE PN10 DN 400 mm y estará dispuesta sobre el muro.

Contará con tres líneas de disposición paralelas, todas de la misma característica que la línea principal, y se ubican en la extensión del muro equidistantes entre sí, cuenta con válvulas para poder descargar en forma unitaria las lamas hacia el interior de la cubeta, para regular el flujo se incorpora placas orificio en la línea de descarga principal. En esta unidad operativa la instrumentación se compone de manómetros y un transmisor de presión en descarga bomba.

1.2.3 Recuperación de Aguas

La recuperación de aguas consta de dos unidades operativas las cuales son estanque agua (sello, lavado, dilución) se muestra en la Figura 1.12 y la piscina de agua recuperada.

La unidad operativa del estanque agua proceso, la clasificación de relaves requiere agua para los siguientes servicios:

- Dilución (deslame) de las arenas (gravitacional).
- Dilución de arenas al muero (gravitacional).
- Lavado de líneas de arenas, lamas y relaves (gravitacional).
- Lavado de línea de arenas, lamas y relaves (gravitacional).
- Agua de sello (a través de 4 bombas Grundfos).

En la unidad operativa del estanque agua es suministrada desde el estanque de dilución y lavado, el cual es alimentado con agua recuperada desde los drenes, o bien desde un arranque desde línea existente de HDPE 315 mm (Tien In 003). Su volumen útil es de 560 m³ (diámetro: 10 m, altura: 11,5 m) además puede descargar 2.500 L/min, posee un flujo magnético (4830-FIT-239), manómetro (4830-PI-240) y transmisor indicador de presión (4830-PIT-241).

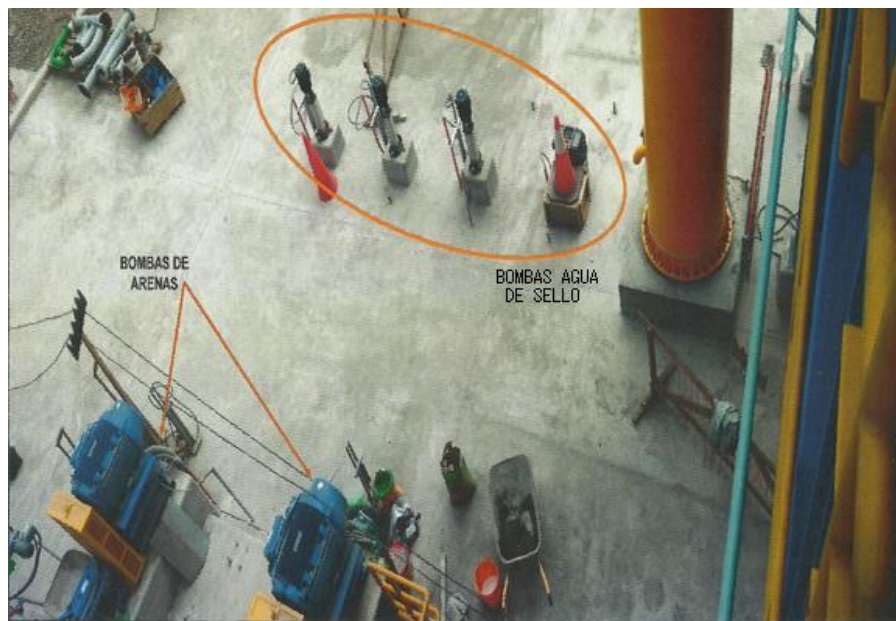
Figura 1.12

Estanque Agua

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

En la unidad operativa de bomba agua de sello como se presenta en la Figura 1.13, la línea matriz de agua (18"-C7-4830-PW-708) existe una conexión que suministra agua para sello (línea: 3"-C8-4830-GS-601) para las siguientes bombas, las bombas de arenas (4830-PPS-001/004) a través de las bombas centrifugas verticales (4830-PPS-001/004), de 4 HP cada una, la bomba de lamas (4830-PPS-005). Cada bomba posee instrumentación, las bombas de sello cuenta para su protección, con medición de presión en la descarga y también disponen de un manómetro para indicación de presión local (4830-PI-195/202/215/222), las bombas de pulpa su flujo de agua de sello es regulado por sendas válvulas de control tipo globo, (Variaciones de flujo al impulsar arenas en los extremos del muro).

Figura 1.13

Bomba Agua de Sello

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

En la unidad operativa del agua de lavado, se considera realizar el lavado, en forma remota-manual, de cajones e impulsores de arenas y lamas en forma. Las áreas específicas que requieren agua de lavado son:

- Cajón de carga.
- Líneas alimentación y descarga ciclones.
- Cajón receptor de arenas.
- Cajón receptor de lamas.
- Impulsión de arenas.
- Impulsión de lamas.

En la unidad operativa del agua de dilución, es utilizada en dos áreas diferentes la primera son los hidrociclones donde se agrega agua de dilución, tal que el contenido máximo de finos en la descarga de los hidrociclones sea menor o igual al 15%, líneas alimentación y descarga ciclones. La segunda es el cajón de arenas para favorecer el transporte de las arenas hasta su punto de descarga sobre el Muro Este (objetivo Cp: 70% $\pm$ 2%).

En la unidad operativa de la piscina de agua recuperada como se observa en la Figura 1.14, el muro de arena se constituye sobre un sistema de drenaje que capta y evacua las aguas percoladas en las arenas. Las tuberías de drenaje cumplen la función de captar y evacuar las aguas de las arenas y captar la filtración proveniente del tranque y de las precipitaciones. Todas las aguas de drenaje del muro Este son captadas en una sentina de hormigón, la cual dispone de bombas verticales que impulsan el agua recuperada hasta el estanque de agua de proceso (TKF-001) desde el cual se distribuye a los distintos servicios.

El sistema se compone de:

- Sentina (4840-SUU-001): recibe las aguas de drenaje del tranque para luego ser impulsadas al TK de agua. Cuenta con sensor de nivel, cámara de rebose la que permite la evacuación del flujo excedente a treves de una tubería de acero de 16" hacia la piscina de emergencia.
- Equipos de bombeo (4840-PPV-001/002): 2 bombas verticales tipo turbina de 250 HP c/u (1+1). En vaciado de piscina se usan 2 bombas simultaneas.
- Línea impulsión a estanque de agua (TKF-001): tubería de acero, de diámetro 12" y espesor de pared de 6,35 mm.
- Línea drenaje piscina: a través de la línea de HDPE 16"-C2-4840-RW-706.
- Piscina emergencia: su volumen total es de 6800 m³, recubierta HDPE.

Figura 1.14

Piscina de Agua Recuperada

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

1.3 Planteamiento de la Problemática

La batería de hidrociclones de la planta de clasificación E.C.M.E. cumple un rol crítico en la separación de arenas y lamas, siendo fundamental para la estabilidad operacional del proceso y la construcción del muro del tranque. Sin embargo, en los últimos años el sistema ha evidenciado una disminución progresiva en su desempeño, reflejada en una baja eficiencia de clasificación, incremento en el consumo de agua y aumento de detenciones no programadas.

El análisis de los indicadores operacionales muestra que la disponibilidad del sistema se encuentra en rangos de 76–78% y la confiabilidad cercana al 32%, valores inferiores a los estándares esperados para este tipo de operación. Asimismo, se ha identificado una reducción en la presión de operación por debajo del rango óptimo (17–21 psi), lo que afecta directamente la calidad de la clasificación, generando una mayor recirculación de finos y una disminución en la producción de arenas.

Estas desviaciones están principalmente asociadas al desgaste progresivo de componentes críticos como el ápex y el vortex, los cuales alteran las condiciones hidrodinámicas internas del hidrociclón, reduciendo su eficiencia y provocando fallas recurrentes en el sistema.

Actualmente, el mantenimiento del equipo se realiza bajo un enfoque predominantemente reactivo, lo que implica intervenciones tardías, mayores tiempos de detención y un aumento en los costos operacionales. Esta situación evidencia la necesidad de implementar un enfoque de mantenimiento más estructurado, basado en confiabilidad, que permita anticipar fallas, optimizar los recursos y mejorar los indicadores de desempeño del sistema.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM II, apoyado en el análisis FMECA, que permita abordar las causas raíz de las fallas, mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema, y optimizar la operación de la planta de clasificación.

Para evidenciar esta problemática desde un enfoque cuantitativo, a continuación, se presenta el análisis de los indicadores operacionales de la planta E.C.M.E., los cuales permiten evidenciar el desempeño real del sistema y fundamentar la necesidad de la propuesta de mantenimiento.

1.4 Análisis de Indicadores de la Planta E.C.M.E.

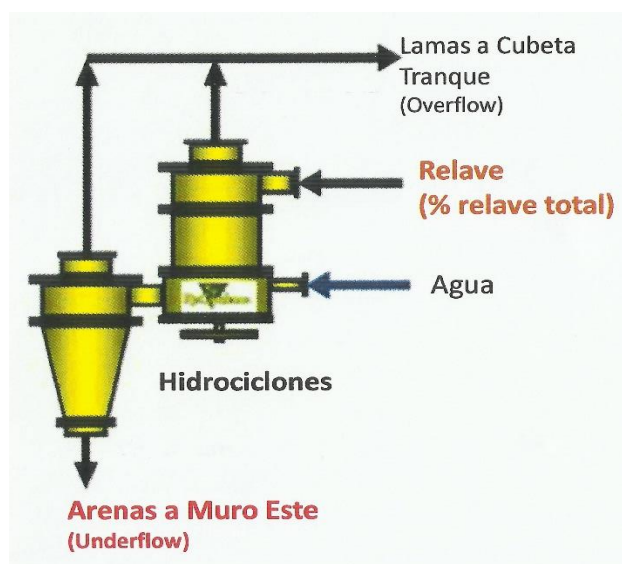
En la planta clasificación E.C.M.E. tendremos dos alimentaciones que son conformadas por relave y agua. Proviene de la planta Las Tórtolas del proceso de flotación se genera la separación del material, la separación consta de los minerales que son el cobre, el molibdeno y el relave.

El relave, es el excedente espesado de la planta de flotación, el cual es depositado en el cajón de relaves, este relave a través de un sistema de bombeo es transportado por el tren B, llegando a la planta clasificación E.C.M.E. para ser depositando al cajón de carga, de ahí es ingresado de forma gravitacional, a su vez el estanque de agua es dirigida a través de bombas hacia las baterías de hidrociclón como se observa en el diagrama de la Figura 1.15.

En los equipos entra el relave junto con el agua, el proceso de los hidrociclones consta de separar el relave, en arenas finas y arenas gruesas. Las arenas finas son salidas a través del overflow y son transportadas a la cubeta del tranque, (la cubeta es la parte interior del tranque) mientras que las arenas gruesas son salidas por el underflow, las cuales son dirigidas a través de ductos hacia el muro este de la planta.

Figura 1.15

Entradas y Salidas de los Hidrociclones



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

1.4.1 Componentes del tranque

En el tranque son depositado los resultados de los procesos de la planta clasificación E.C.M.E. los cuales son:

- Overflow: son las arenas finas las cuales son depositadas en la cubeta del tranque.
- Underflow: Son las arenas gruesas, las cuales se depositan en el muro este de la planta.

El tranque este compuesto por: muro principal, muro oeste, muro sur, muro este como se muestra en la Figura 1.16. A través de los procesos de la planta clasificación E.C.M.E. las arenas gruesas son depositadas solamente en el muro este, las arenas finas son depositadas en la cubeta (la cubeta es donde se contiene el agua), las arenas finas permiten que el nivel del agua no se pierda a la vez que crecen los muros.

Figura 1.16

Composición del Muro y Tranque de la Minera



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

1.4.2 Reutilización del agua en el tranque

La reutilización del agua funciona con las arenas finas depositada, generando una pendiente para que el agua fluya hasta la zona de bombeo que será transportada hasta la planta clasificación E.C.M.E. nuevamente, depositándola en el tanque de agua, una vez llenado el tanque de agua el excedente es transportados por minero ductos.

Las mayores pérdidas que se ocasionan en este proceso son: la evaporización, el agua retenida en las arenas de la cubeta y la humectación.

1.4.3 Vida útil del tranque

La vida útil del tranque es basada en la construcción, para esto se debe considerar una medición del nivel de agua y las arenas en el tranque es realizada a través de topografía satelital y de terreno para tener las dimensiones del volumen de agua que se evapora y un volumen de agua existente, controlando el crecimiento de la cubeta como también de los muros, deben de tener tres metros de revancha los muros.

1.4.4 Indicadores de la batería de hidrociclones del último año

Los datos correspondientes a los indicadores se obtuvieron a partir de los tiempos totales de operación, el número total de fallas registradas, así como del tiempo total de inactividad asociado a cada falla. Esto permite calcular de manera estimativa la disponibilidad y la confiabilidad del equipo, dado que no fue posible obtener los KPI's (Key Performance Indicators) oficiales del mismo presentado en la Tabla 1.2.

En este contexto, se realizará un cálculo referencial que proporcione una visión representativa del estado operativo del sistema.

Como primer paso, se llevará a cabo el desglose del MTBF (Mean Time Between Failures) y MTTR (Mean Time To Repair), a partir del cual será posible determinar los índices de confiabilidad y disponibilidad del equipo.

MTBF de la batería hidrociclón

$$MTBF_{BATERIA} = \frac{\text{Tiempo total de operacion}}{\text{Numero total de falla}} = \text{Horas/Falla}$$

MTTR de la batería hidrociclón

$$MTTR_{BATERIA} = \frac{\text{Tiempo total de inactividad por fallas}}{\text{Numero total de falla}} = \text{Horas/Falla}$$

Calcular la tasa de fallas (λ)

$$\lambda_{BATERIA} = \frac{1}{MTBF_{BATERIA}} = \text{Falla/Horas}$$

Calcular el porcentaje de confiabilidad para un período de operación R(t)

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Calcular la disponibilidad (A)

$$A_{BATERIA} = \frac{MTBF_{BATERIA}}{MTBF_{BATERIA} + MTTR_{BATERIA}}$$

Tabla 1.2

Indicadores de Confiabilidad y Disponibilidad Actual

Mes	Horas	Fallas	MTBF	λ (fallas/h)	Confiabilidad	Tiempo	MTTR	Disponibilidad (A)
Enero	720	3	230	0,00370	0,32	240	76,7	0,77877127
Febrero	720	2	150	0,00370	0,32	360	75	0,7826087
Marzo	720	3	225	0,00370	0,32	240	75	0,7826087
Abril	720	2	155	0,00370	0,32	360	77,5	0,77697842
Mayo	720	3	230	0,00370	0,32	240	76,7	0,77877127
Junio	720	2	150	0,00370	0,32	360	75	0,7826087
Julio	720	3	230	0,00370	0,32	240	76,7	0,77877127
Agosto	720	3	235	0,00370	0,32	240	78,3	0,7751938
Septiembre	720	3	150	0,00370	0,32	360	75	0,7826087
Octubre	720	2	230	0,00370	0,32	240	76,7	0,77877127
Noviembre	720	3	150	0,00370	0,32	360	75	0,7826087
Diciembre	720	1	151,8	0,00370	0,32	720	151,8	0,6401138
Total	8640	32	2436,8	0,00370	32%	270	76,15	76,83%

Nota. Elaboración propia

1.5 Desempeño del Proceso

El sistema presenta deficiencias en el proceso de clasificación, las cuales se evidencian en el comportamiento de los indicadores de disponibilidad y confiabilidad operacional. La siguiente tabla resume el desempeño observado en la batería de hidrociclones. A partir de estos resultados, se analizan indicadores clave asociados a producción, calidad y eficiencia, con el objetivo de identificar desviaciones entre el desempeño real, el desempeño esperado y las metas proyectadas como aparecen en las Tablas 1.3 y su rendimiento en la Tabla 1.4.

Tabla 1.3

Datos de Planta E.C.M.E

Unidad Operativa	KPI y Parámetro	Valor Ideal (Referencia)	Valor Real Operacional	% de Desempeño	Posible Consecuencia
Batería de hidrociclones	Producción (relación arenas/lamas)	Razón ideal: 38% / 62%	Razón real: 23% / 45%	35%	-Baja producción de arenas hacia muro - Mayor volumen de lamas a transportar o disponer.
	Porcentaje (finos en arenas)	$\leq 30\%$	Finos en descarga 20%	24%	- Lamas baja calidad. - Reducción de la estabilidad.
	Disponibilidad (presión ciclones)	21 psi (Cp 55%) 17 psi (Cp 30%)	Presión 15%-19%	68%	- Ineficiencia en la separación de arenas y lamas. - Deterioro de los hidrociclones y las válvulas.
	Cantidad agua	Controlada por válvulas	Consumo del 10%	50%	- Mayor consumo de agua. - Aumento de costos operativos.

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Tabla 1.4

Datos de Rendimiento del Mantenimiento

Indicador de rendimiento	Parámetro de seguimiento	Valor del indicador	Meta para alcanzar	Análisis de la confiabilidad
MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas)	Número total de horas operativas continuas de la batería de hidrociclón	540 horas (batería de hidrociclón)	700 horas	El MTBF indica que la batería de hidrociclón presentando menor confiabilidad, lo que puede deberse a un desgaste más rápido de sus componentes o una falla en su calibración.
MTTR (Tiempo Medio para Reparar)	Tiempo promedio para la reparación de una falla no planificada.	96.5 horas por evento	≤ 50 horas	El MTTR actual muestra que los tiempos de detención son prolongados. Esto puede deberse a la complejidad del procedimiento de cambio o la necesidad de personal especializado.
Costos de mantenimiento por hora	Costo total de mantenimiento (repuestos, mano de obra) dividido por horas de operación.	\$350 USD/hora	\$250 USD/hora	El costo es elevado debido al reemplazo frecuente de componentes y los altos costos asociados a la mano de obra especializada para las reparaciones.

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Los resultados evidencian que la batería de hidrociclones presenta desviaciones importantes respecto a los valores de referencia, especialmente en la proporción de arenas producidas, el contenido de finos y la presión de operación de los ciclones, lo que se traduce en una menor eficiencia en la separación y una reducción en la calidad del material destinado al muro del depósito. Asimismo, se observan variaciones en el consumo de agua de dilución, que podrían estar asociadas a ajustes manuales de válvulas o a la falta de control automático, afectando los costos operativos y el balance hídrico del proceso.

1.6 Síntesis del Diagnóstico de la Batería hidrociclones

La planta de clasificación E.C.M.E. ha presentado en los últimos años un desempeño inferior a los estándares de cumplimiento, impactando directamente en los niveles de producción. El proceso opera de forma continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana, lo que genera un desgaste acelerado en los hidrociclones. Este deterioro se manifiesta principalmente en caídas de presión operativa por debajo de los 17 psi, afectando la estabilidad del sistema.

El impacto operativo derivado de esta baja presión provoca una separación deficiente de partículas, generando una mezcla inadecuada de finos y gruesos. En consecuencia, se observa una reducción en la calidad de las arenas, con un desempeño de apenas 24%, y una relación arenas/lamas de 35%, lo que repercute negativamente en la producción de relaves y en la eficiencia global del proceso.

En cuanto a los indicadores de mantenimiento, la disponibilidad promedio alcanza un 86% y la confiabilidad un 38%, valores que se han visto afectados por detenciones no programadas. Estas detenciones requieren la aplicación de procedimientos de bloqueo, aislamiento de líneas, coordinación con sala de control y permisos de trabajo, lo que genera tiempos muertos y pérdidas directas en los indicadores operacionales.

Adicionalmente, se ha identificado una tendencia a incrementar el flujo de agua de alimentación como medida compensatoria ante la pérdida de eficiencia en los ciclones.

Sin embargo, esta práctica genera un mayor consumo de agua, un sobreesfuerzo en bombas y líneas de presión, y compromete tanto la eficiencia operacional como la sustentabilidad del proceso a largo plazo.

En síntesis, el sistema presenta una degradación progresiva de su desempeño asociada principalmente al desgaste de componentes críticos y a la falta de un enfoque de mantenimiento estructurado, lo que se traduce en una disminución de la eficiencia de clasificación, aumento de fallas y mayores costos operacionales. El análisis desarrollado en este capítulo permite dar cumplimiento al objetivo específico 1, ya que, a partir de los datos operacionales, indicadores de desempeño y antecedentes técnicos del sistema, se identificaron los principales modos de falla que afectan la confiabilidad y disponibilidad de la batería de hidrociclones. Este diagnóstico constituye la base para la posterior aplicación de la metodología R.C.M II y F.M.E.C.A. lo cual será desarrollado en el capítulo siguiente.

Capítulo 2: Bases Teóricas de la Confiabilidad y el Mantenimiento Industrial

2.1 Problema Asociado al Equipo

En este capítulo se considerará la información necesaria para la operación ideal del hidrociclón a través de parámetro de funcionamientos de acuerdo con las metodologías y análisis referente a los principales tipos de fallas dentro del hidrociclón, que afectan altamente a la producción y a los recursos de la empresa, para ello se utilizara el R.C.M. II en conjunto al F.M.E.C.A. y de la criticidad en el equipo.

2.2 Antecedentes del Hidrociclón

La separación por sedimentación de partículas se da en la naturaleza en cualquier lago o estanque donde se introduce agua turbia. Las partículas se posan en el fondo, formando un sedimento que posee un grado de espesado en relación con la concentración de la alimentación (feed), mientras que el agua sobrante es clarecida y eliminada como lujo superior (overflow).

2.2.1 El fenómeno del hidrociclón

El hidrociclón recibe la suspensión de alimentación de forma tangencial, impulsada por presión controlada, lo que induce un movimiento rotacional en el interior del equipo. Este flujo genera un torbellino primario que se desarrolla a lo largo de las paredes cilíndricas y cónicas, donde las fuerzas centrífugas son mucho mayores que la gravedad, provocan la sedimentación acelerada de las partículas sólidas.

Las partículas más gruesas o de mayor densidad se concentran en la periferia y son descargadas a través del flujo inferior (underflow) por la boquilla cónica.

En cambio, la mayor parte del líquido junto con partículas finas remanentes asciende por la tobera superior (overflow). Este flujo ascendente da origen a un torbellino secundario, que se desarrolla alrededor del núcleo central del ciclón.

En el interior del núcleo se forma una zona de depresión, la cual capta burbujas de aire, gases disueltos en el agua de alimentación e incluso vapor, conformando la columna de aire visible característica de estos equipos.

El aumento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario incrementa las fuerzas centrífugas, generando una separación secundaria más eficiente, que mejora la clasificación de partículas. No obstante, parte de las fracciones finas rechazadas tienden a sedimentar radialmente, reincorporándose al torbellino primario y siendo finalmente evacuadas por el vórtice inferior, junto con las partículas gruesas.

2.2.2 Principio de funcionamiento de los hidrociclones

Las fuerzas que actúan sobre las partículas livianas dentro de un medio denso, provocando la flotación de estas, producen además que estas asciendan a la superficie, mientras que las partículas más densas, al ser más pesadas que el fluido que desplazan, se hunden.

Las magnitudes de estas fuerzas, gravitacionales y de empuje, son de mucha importancia, ya que estas son las que regirán la velocidad con la que se producirá la separación de las partículas, lo cual a su vez determinará cual debe ser la capacidad del estanque (hidrociclón). Dentro del hidrociclón donde las partículas de un cierto tamaño y densidad alcanzan un equilibrio en posición orbital específico. La teoría de equilibrio orbital se alcanza cuando las fuerzas centrífugas que actúan sobre la partícula se igualan a las fuerzas de arrastre.

Cuando la órbita es representada por partículas que tienen la misma probabilidad de salir del hidrociclón, el rebalse o la descarga, las partículas que se localicen entre la pared del equipo y esta órbita ($F_c > F_d$) lograrán una mayor probabilidad de salir por la descarga del hidrociclón, por lo contrario ($F_c < F_d$) obtendrá mayor probabilidad de salir por el rebalse del hidrociclón.

Para separadores centrífugos, la fuerza centrífuga actúa dentro del hidrociclón aplicando sobre la partícula esférica de diámetro “d” expresado:

$$F_c = \frac{\pi d^3 (P_s - P) V_t^2}{6 r}$$

Donde: F_c : Fuerza centrífuga.

d : Diámetro de la partícula.

P_s : Densidad de sólidos.

P : Densidad del fluido.

V_t : Velocidad tangencial.

Desde otra perspectiva, el flujo laminar se puede aplicar con la ley de Stokes, por lo cual la fuerza de arrastre se expresa:

$$F_d = 3 \pi d \mu V_r$$

Donde: F_d : Fuerza de arrastre.

d : Diámetro de la partícula.

μ : Viscosidad del fluido.

V_r : Velocidad radial.

Las partículas que estén sujetas a una fuerza resultante pequeña se comportarán según la Ley de Stokes, donde la resistencia del fluido se debe principalmente a su viscosidad. Las partículas que estén sujetas a fuerzas de mayor magnitud se regirán por la ley según Newton, donde la resistencia del fluido es principalmente inercial e independiente de la viscosidad.

2.3 Conjunto de la Batería del Hidrociclón

El equipo batería de hidrociclones está construido por los siguientes componentes para cumplir la función de clasificar las arenas finas y gruesas, toneladas por horas y días.

Batería: La batería de hidrociclones corresponde al conjunto de equipos que logran la clasificación del relave como se aprecia en la Figura 2.1, tales como: hidrociclones, válvulas de alimentación, distribuidor radial y rebalse. Contamos con instrumentación de medición como manómetro, fluxómetros y tapas de inspección.

Figura 2.1

Batería de Hidrociclones

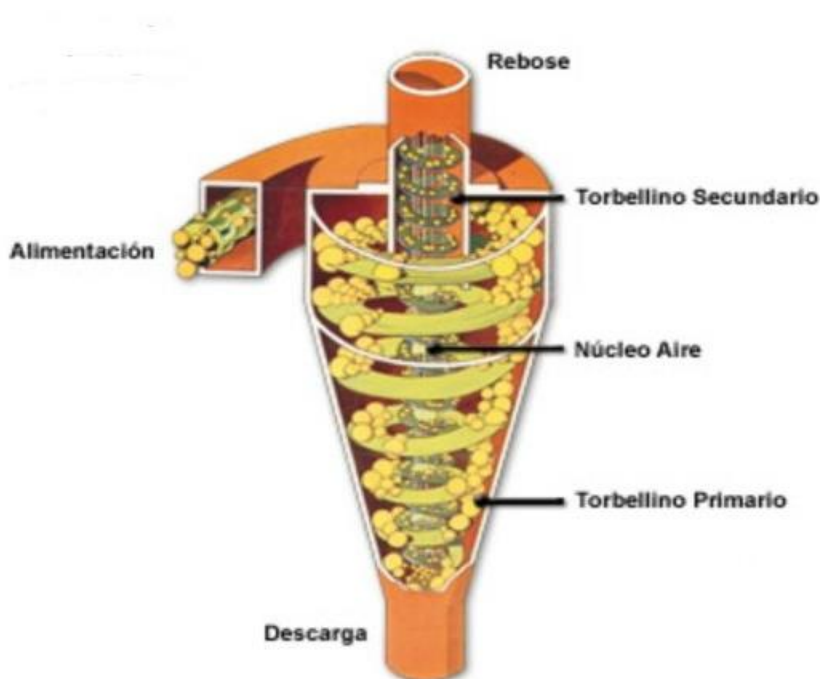


Nota. Empresa Espiasa

Ciclón: El ciclón contiene una forma cilindro-cónica con una entrada tangencial y dos salidas en cada uno de los extremos de su eje. Los ciclones son dispositivos de clasificación que utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas de distintos tamaños mostrado en la Figura 2.2.

Figura 2.2

Ciclón



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Hidrociclón: Un hidrociclón es un tipo de ciclón que combina la aplicación neumática donde el medio a procesar es un líquido que contiene partículas sólidas en suspensión (relave). Logrando separar o clasificar partículas sólidas de acuerdo con su tamaño mostrado en la Figura 2.3.

Figura 2.3

Hidrociclón

Nota. Weir Minerals

Recyclón: se le llama a un conjunto de hidrociclones, donde es una unidad de doble clasificación como se observa en la Figura 2.4, que funciona en una sola etapa, sin bombeo intermedio, ha demostrado ser extremadamente eficiente y la eficiencia de clasificación se refleja en la capacidad de generar un by-pass muy bajo de finos en el flujo inferior mientras se reduce el desplazamiento de partículas gruesas al desbordamiento.

Figura 2.4

Recyclón

Nota. Elaboración propia

Ápex: Es la salida del ciclón comúnmente es una parte cilíndrica corta y simple, su diámetro interno se cambia para alcanzar el rendimiento requerido. El tamaño del Ápex tiene la mayor influencia sobre la densidad de descarga como se aprecia en la Figura 2.5. Cuenta con revestimientos de diferentes características y resistencias, abarcando desde la goma natural al revestimiento cerámico.

Figura 2.5

Ápex

Nota. Elaboración propia

Vortex: Los ciclones son operados generalmente en una posición vertical de modo que el Vortex descarga en forma vertical para producir la descarga. En aplicaciones de pulpa, la descarga contiene el producto sólido más grueso y de una mayor densidad el cual se muestra en la Figura 2.6.

Figura 2.6

Vortex

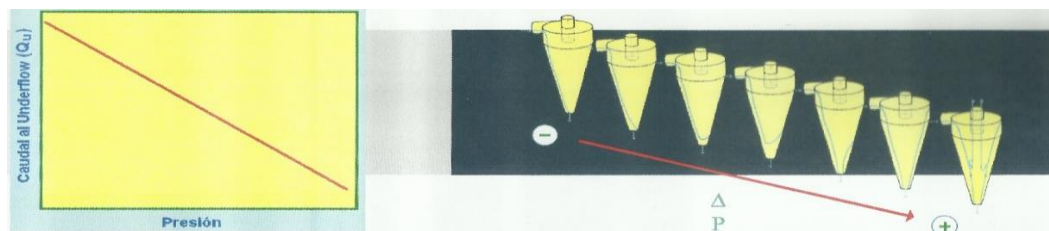


Nota. Elaboración propia

2.3.1 Presión de los ciclones

La presión es inversamente proporcional al caudal en la descarga del ciclón, es decir, al tener una baja presión todo el caudal se reportará en el underflow como se enseña en la Figura 2.7 y los indicadores del hidrociclón en la Figura 2.8. A medida que se aumenta la presión, el caudal reportado en la descarga del ciclón, ira en descenso, puesto que la pulpa se comenzara a reportar en el rebalse del cicló.

Figura 2.7

Caudal vs Presión

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Figura 2.8

Indicadores de Hidrociclón

Respuesta ↑ Efecto	ΔP	d_{50}^c	%Sol Underflow	%Sol Overflow
Q Alimentación	↑	↓	↑	↓
P Alimentación	↑↓	↑	↑	↑
D Vortex	↓	↑	↑	↑
D Apex	↓	↓	↓	↓
D Area Entrada	↓	↑	↓	↑

Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones*

Muro Este, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

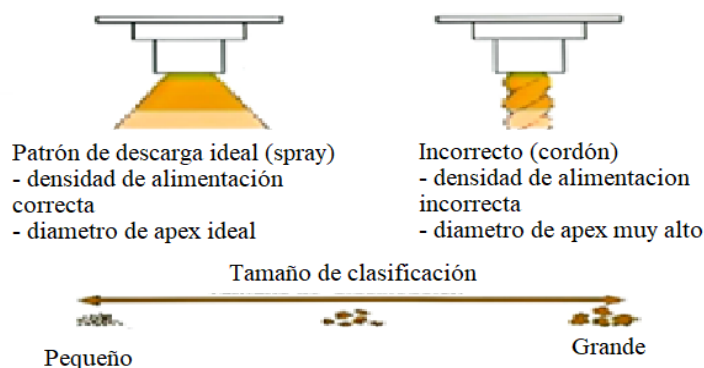
2.3.2 Parámetros de operación bajo efectos del desgaste

La principal anomalía que presenta el equipo, tenemos los desgaste en el vortex y Ápex, estos desgastes son visualizados debido a la medición de la presión interna de los hidrociclones, cuando arroja una presión menor a la presión de operación, esto no significa que el equipo perdió sus parámetros de operación ideales, sino que no cumpliendo su función correctamente, al disminuir la presión, la concentración en peso (C_p) tiende a disminuir, y salir del rango de 30% a 55%.

perder el porcentaje de concentración idóneo, es decir, que las concentraciones de arenas finas y gruesas ya no contienen una alta pureza, y tienden a mezclarse nuevamente y salir por el Ápex.

Figura 2.9

Descarga del Ápex

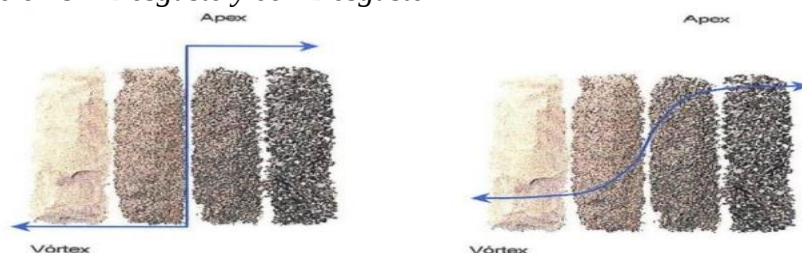


Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

Se obtiene una clasificación ideal cuando al tamaño de corte el cual opera todas las partículas que se encuentran a mayor tamaño pasan al Ápex del ciclón y todas las partículas de tamaño menor pasan al vortex. El resultado de la clasificación de las arenas se presenta en la Figura 2.9 donde la clasificación es ideal en el lado izquierdo, mientras que del lado izquierdo presenta desgaste en sus componentes, además en la Figura 2.10 se observa dos diferentes clasificaciones del lado izquierdo componentes sin desgaste .

Figura 2.10

Clasificación sin Desgaste y con Desgaste



Nota. Adaptado de *Confección de Manuales y Capacitaciones para PEM Proyecto Ciclones Muro Este*, por JRI Ingeniería, noviembre de 2016.

2.3.3 Propuesta de la problemática

Como se ha mencionado en el capítulo anterior la principal problemática está relacionada con el desgaste en el vortex y el Ápex, esto implica que la presión interna del hidrociclón disminuya, producto que el hidrociclón debe tener una presión constante variando en los 17 a 21 psi, se le agrega más presión a través del agua, pero esto implica un mayor consumo de agua, por ende, se generan gastos que podrían ser previstos y evitar esas pérdidas.

Se implementarán actividades de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo con el propósito de evitar la problemática principal de este equipo. Para ello, será necesario analizar los modos de falla asociados, clasificarlos y jerarquizarlos de acuerdo con su nivel de criticidad, ordenándolos de mayor a menor impacto. Con el fin de garantizar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad de los equipos involucrados, así como de evitar costos de reparación imprevistos que no estén contemplados en la planificación, se propone la implementación de un plan de mantenimiento predictivo. Este plan estará enfocado principalmente en los puntos críticos del hidrociclón, tales como el Ápex y el vortex, donde suelen concentrarse las fallas más relevantes.

2.4 Mantenimiento Industrial

Es una combinación de actividades técnicas, gestión y administración durante el periodo de vida útil de un equipo o maquinaria destinada a ser mantenida y conservada en un estado óptimo para su utilización dentro de su función.

Tiene como objetivos el asegurar que un equipo o maquinaria tenga una buena disponibilidad de sus funciones y en confiabilidad, además en el mantenimiento se aplican técnicas para la predicción de fallas y averías, entre las técnicas consisten en, revisiones, reparaciones y la reconstrucción de estructuras, engrases e instrucciones de operación de cada tipo de maquinaria.

Para aplicar una mejora en el plan de mantenimiento, primero que nada, se debe tener conocimiento acerca del plan de mantenimiento actual por el que está pasando el equipo y además se debe tener noción respecto a los tipos de mantenimiento que existen, con el fin de identificar la opción más apropiada para el análisis de la problemática planteada.

A lo largo de los años se han presentados diferentes tipos de mantenimientos, estos se crean o aparecen según las necesidades de las industrias de las maquinarias, también se implementan de acuerdo a los ingresos o las capacidades económicas de una empresa, ya que por ejemplo en empresas pequeñas, no se utilizaría un mantenimiento predictivo, ya que se requiere tener un alto ingreso para implementar este tipo de mantenimiento ya que tiene un costo elevado debido a la instrumentación requerida para hacerlo efectivo, es por eso que existen diferentes tipos de mantenimientos, entre los más importantes se pueden mencionar.

2.5 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

El mantenimiento centrado en la confiabilidad o también conocido como R.C.M. II se desarrolla bajo el enfoque con los criterios establecidos en la norma SAE JA1011, la cual define los requisitos mínimos que debe cumplir cualquier proceso para ser considerado verdaderamente RCM II. Asimismo, se utiliza la guía SAE JA1012 para ampliar y clarificar conceptos como contexto operacional, funciones, fallas funcionales, modos de falla, consecuencias y selección de manejo de fallas. se reconoce como una estrategia más rigurosa para la elaboración del plan de mantenimiento, ya que incorpora una lógica de decisión centrada en las consecuencias de falla, se desarrolla bajo un procedimiento más estandarizado y establece criterios más estrictos para la selección de tareas, en función de su factibilidad técnica y económica. Con el objetivo aumentar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos disminuyendo el tiempo de detención de estos y sus costos asociados. También busca analizar las fallas críticas que se pueden originar y estudiar las consecuencias que estas traerían al equipo para así poder lograr una solución en actividades de mantenimiento indicadas o modificaciones si es necesario.

2.5.1 Enfoque RCM II y criterios SAE JA1011/JA1012

El enfoque RCM II, desarrollado por Moubray, se complementa en este trabajo con los criterios de evaluación de la norma SAE JA1011 y con la guía de aplicación SAE JA1012. La norma SAE JA1011 establece que un proceso de RCM II debe responder satisfactoriamente siete preguntas en una secuencia definida: funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos de falla, consecuencias de falla, tareas proactivas y acciones predeterminadas. Por su parte, SAE JA1012 amplifica estos criterios y proporciona lineamientos para definir el contexto operacional, distinguir funciones primarias y secundarias, identificar fallas parciales y totales, clasificar consecuencias y seleccionar políticas de manejo de fallas.

En consecuencia, en este estudio el análisis FMECA se utiliza como herramienta de identificación y priorización de modos de falla, mientras que el RCM II, apoyado en SAE JA1011 y SAE JA1012, constituye la lógica metodológica que permite justificar la selección de las tareas de mantenimiento propuestas.

2.5.2 Las 7 preguntas

La implementación de esta técnica se basará en el criterio por SAE JA1011, asegurando la coherencia metodológica del RMC II buscando identificar función, las fallas funcionales, los modos de falla, sus efectos, sus consecuencias y la selección de las tareas.

- ¿Cuál es la función?

Para responder, es necesario considerar las funciones que los usuarios esperan que el equipo cumpla y verificar que efectivamente sea capaz de realizarlas, definiendo con precisión cuáles son esas funciones esperadas.

- ¿Cuál es la falla funcional?

Para responder, se deben identificar las fallas que impiden que el equipo cumpla con su función. Dichas fallas representan la imposibilidad de utilizar el equipo para el propósito que el usuario requiere.

- ¿Cuál es el modo de falla?

Para responder, es fundamental comprender el concepto de falla funcional, entendido como la ausencia de la función principal del equipo o el incumplimiento de los parámetros mínimos aceptables para su ejecución. Se originaron dichas fallas y los eventos que las desencadenaron, conocidos como modos de falla.

- ¿Cuál es el efecto de la falla?
- ¿Cuál es la consecuencia de la falla?

En los modos de falla pueden identificarse causas que incluso se repiten en otros equipos. Para reconocerlas correctamente, es necesario elaborar una lista que incluya todas las relacionadas con el diseño y la operación del equipo, por ende, se clasificaran en la siguiente manera:

- La evidencia de que la falla ha ocurrido
- Si representa una amenaza en seguridad del personal y el medio ambiente.
- Como afectara a la operación del equipo.
- Los daños que ha causado la falla.
- Que se hará para reparar la falla.
- ¿Qué se puede hacer para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?

Para responder, es necesario prevenir las fallas, el R.C.M. propone el uso de actividades proactivas, esas son conocidas como actividades que se realizan antes de que suceda alguna falla, conocidas como mantenimiento preventivo y predictivo. En el caso no se lograra implementar las actividades proactivas ideales en el equipo, el R.C.M. propone soluciones como: analizar la falla, rediseñar el equipo y aplicación de un mantenimiento correctivo.

- ¿Qué se hace si no se encuentra ninguna tarea para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?

Se deben evaluar acciones complementarias, como rediseños, cambios en la operación o controles específicos, con el fin de abordar la causa raíz y reducir el impacto del modo de falla.

2.5.3 Factores de evaluación, comparación y matriz de criticidad

En la planta de clasificación E.C.M.E. se realiza el análisis al conjunto de equipos que se componen con el objetivo de determinar la importancia de sus activos físicos mediante la matriz de criticidad, permitiendo compararlos, jerarquizarlos y priorizar su gestión de mantenimiento.

Frecuencia de falla (FF)

Impacto Operacional (IO)

Flexibilidad Operacional (FO)

Costos de Mantenimiento (CM)

Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)

Repuestos en Stock (RS)

Criticidad: Frecuencia de falla x Consecuencia

Consecuencia = ((IO x FO) + CM + SHA + RS)

Por último, se sumarán todos los valores para verlos reflejados en la matriz de criticidad, de esta manera identificaremos el activo más crítico, medianamente crítico, normalmente crítico. Las normas asociadas corresponden a la ISO 31000:2018.

Tabla 2.1

Escala de Frecuencia

Frecuencia	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		Consecuencia				

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.2

Frecuencia de Falla (FF)

Puntaje	Condición	Características
4	Muy crítico	Mayor a 10 fallas/año
3	Crítico	Entre 6 y 10 fallas/año
2	Promedio	Entre 3 y 5 fallas/año
1	Bueno	Menos de 2 fallas/año

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.3

Impacto Operacional (IO)

Puntaje	Condición	Características
10	Muy crítico	Parada inmediata de toda la producción
6	Crítico	Disminuye la producción en un 50%
3	Promedio	Disminuye la producción en un 25%
1	Bueno	No afecta la producción

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.4

Flexibilidad Operacional (FO)

Puntaje	Condición	Características
4	Crítico	La reparación dura más de 12 horas.
3	Promedio	La reparación dura entre 4 a 12 horas.
1	Bueno	La reparación dura hasta 4 horas.

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.5

Costos de Mantenimiento (CM)

Puntaje	Condición	Características
3	Crítico	Mayor o igual a \$8.000.001
2	Aceptable	Entre \$3.000.001 y \$8.000.000
1	Dentro del presupuesto	Menor o igual a \$3.000.000

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.6

Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)

Características	Puntaje
Alto impacto en la seguridad humana/ambiente.	7
Afecta las instalaciones causando severos daños	5
Provoca daños menores (accidentes e incidentes), impacto ambiental bajo	3
Provoca molestias mínimas en las instalaciones y ambiente	1

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.7

Repuestos en Stock (RS)

Características	Puntaje
No disponible, demora >1 semana	3
No disponible, llega en 2–5 días	2
Disponible en stock	1

Nota. Elaboración propia a partir de *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (SAE International, 2016).

Tabla 2.8

Jerarquización Planta Clasificación E.C.M.E

Equipos identificados	FF	IO	FO	CM	SHA	RS	TOTAL
Batería de hidrociclón	6	12	2	1	4	3	192
Bombas de impulsión	5	12	1	1	4	1	90
Bombas verticales	3	12	1	2	3	1	54
Válvulas pinch	3	12	1	2	1	1	48
Bomba de agua de sello	3	12	1	1	1	1	45
Válvula cuchillo	1	2	2	6	4	1	15
Estanque	5	2	1	1	1	1	25
Tolva	1	12	1	1	1	3	17
Tubería	3	2	1	1	1	3	21

Nota. Elaboración propia

De acuerdo con la evaluación de criticidad realizada conforme a los lineamientos de la norma ISO 31000 como se muestran de las Tabla 2.1 hasta 2.8, se identificaron los equipos más relevantes de la planta de clasificación en función de su frecuencia de falla, impacto operacional, flexibilidad de reparación, costos de mantenimiento, seguridad y disponibilidad de repuestos.

El análisis permitió determinar que los equipos principales asociados al proceso de clasificación, como la batería de hidrociclones y las bombas de impulsión, son los más críticos dentro del sistema. Esto se debe a que su funcionamiento está directamente relacionado con la continuidad del proceso productivo y una falla en ellos podría generar una detención total o parcial de la operación.

Las bombas verticales y las válvulas pinch presentan un nivel de criticidad medio, al cumplir funciones de soporte dentro del circuito hidráulico. Si bien su falla puede afectar el control del flujo o el transporte de pulpa, su reparación resulta relativamente rápida y con disponibilidad de repuestos en planta.

Los equipos secundarios, como las válvulas cuchillo, estanques, tolvas, tuberías y bombas auxiliares, muestran una criticidad baja, ya que su incidencia en la producción es limitada y su mantenimiento no requiere grandes recursos ni tiempos prolongados de intervención.

En conjunto, la jerarquización obtenida orienta la priorización de recursos y estrategias de mantenimiento hacia los equipos de mayor impacto operativo, permitiendo optimizar la confiabilidad de los sistemas y minimizar los riesgos de interrupciones no programadas en la planta.

2.5.4 Análisis de modo de falla

El análisis de modo de falla o bien abreviado F.M.E.C.A. es una metodología que cuyo fin tiene identificar y analizar todos los modos de fallos potenciales de las diferentes partes de un equipo, los efectos que estos fallos puedan tener en el equipo, cómo evitar los fallos y/o mitigar sus efectos en el equipo.

Este método nos permite tener una mayor confiabilidad, seguridad, disponibilidad como también reducir los costos de mantenimiento del equipo. La aplicación del F.M.E.C.A. se deberán desarrollar funciones: Sistema/Subsistema, Descripción de la Función, Falla Funcional, Falla Total, Falla parcial como se desarrolla en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9

Funciones principales del equipo

Sistema/Subsistema	Descripción de la Función	Falla Funcional	Falla Total	Falla parcial
Sistema clasifica arenas finas y gruesas	Clasifica arenas finas y gruesas, operando con una capacidad de producción entre 1000 t/h al 30% y 1510 t/h 50% arenas, 151 t/h al 30% y 272 t/h 50%, bajo una presión de operación de 21 a 17 psi.	El sistema no logra cumplir la función de clasificar en el rango de producción establecido entre 1000 t/h al 30% y 1510 t/h 50% arenas, 151 t/h al 30% y 272 t/h 50%.	El sistema no realiza la clasificación de relave o no mantiene la presión operativa requerida de 21 a 17 psi.	El sistema realiza la clasificación de producto, pero con una capacidad inferior a 1000 t/h al 30% y 1510 t/h 50% arenas, 151 t/h al 30% y 272 t/h 50%, aunque dentro del rango de presión de 21 a 17 psi.

Nota. Elaboración propia

2.5.5 Tabla F.M.E.C.A.

La tabla alude a un orden sobre los datos solicitados para la realización del análisis.

Por ende, se necesita la información de la norma SAE J1739.

- Función.
- Modo de falla.
- Efecto potencial de la falla.
- Severidad.
- Ocurrencia.
- Detectabilidad.
- Numero de probabilidad de riesgo.
- Acciones recomendadas.

Para la obtención de información, se debe de tener una noción clara de las funciones necesarias del equipo, como el de sus componentes principales para así desarrollar los modos de falla que afecta la funcionalidad del equipo.

2.5.5 Efecto y severidad de los modos de falla

Los efectos de fallas describen todas las consecuencias provocadas por el modo de falla, esto implica las causas de porque se generó un modo de falla determinado, por ejemplo, como efecto de las fallas tenemos

- Perdida de la funcionalidad del equipo, inestabilidad o ruido.
- Perdida de tolerancia dimensional, disminución de la capacidad de operación del producto o función.

2.6 Diagrama De Decisiones R.C.M. II

El diagrama de decisiones es una herramienta aplicada al R.C.M. II y desarrollada con mayor detalle con la norma SAE JA1012 de esta manera elegir la elección de las tareas y actividades de mantenimiento a realizar a los equipos, realizando evaluación de la consecuencia dominante, la apreciación de la falla potencial, la factibilidad técnica de la tarea y su conveniencia económica, tal como exige la norma SAE JA1011 y SAE JA1012.

Al responder las preguntas con las consecuencias que podría generar cada modo de falla, relacionadas con fallas ocultas, seguridad o medio ambiente, operacionales y no operacionales. Estas preguntas son guiadas por las letras H, S, E, O las cuales definen las siguientes preguntas, para posteriormente los subniveles, véase en la figura 2.11 Diagrama de decisiones de R.C.M.

H: ¿Sera evidente a los operarios la perdida de función causada por este modo de fallo actuando por el solo en circunstancias normales?

S: ¿Produce este modo de fallo una pérdida de función y otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien?

E: ¿Produce este modo de fallo una pérdida de función u otros daños que pudieran infringir cualquier normativa o reglamento del medio ambiente?

O: ¿Ejerce el modo de fallo un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional (producción, calidad, servicios o costos operativos además de los de operación)?

H1-S1-O1-N1: ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea a condición?

H2-S2-O2-N2: ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de reacondicionamiento cíclico?

H3-S3-O3-N3: ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de sustitución cíclica?

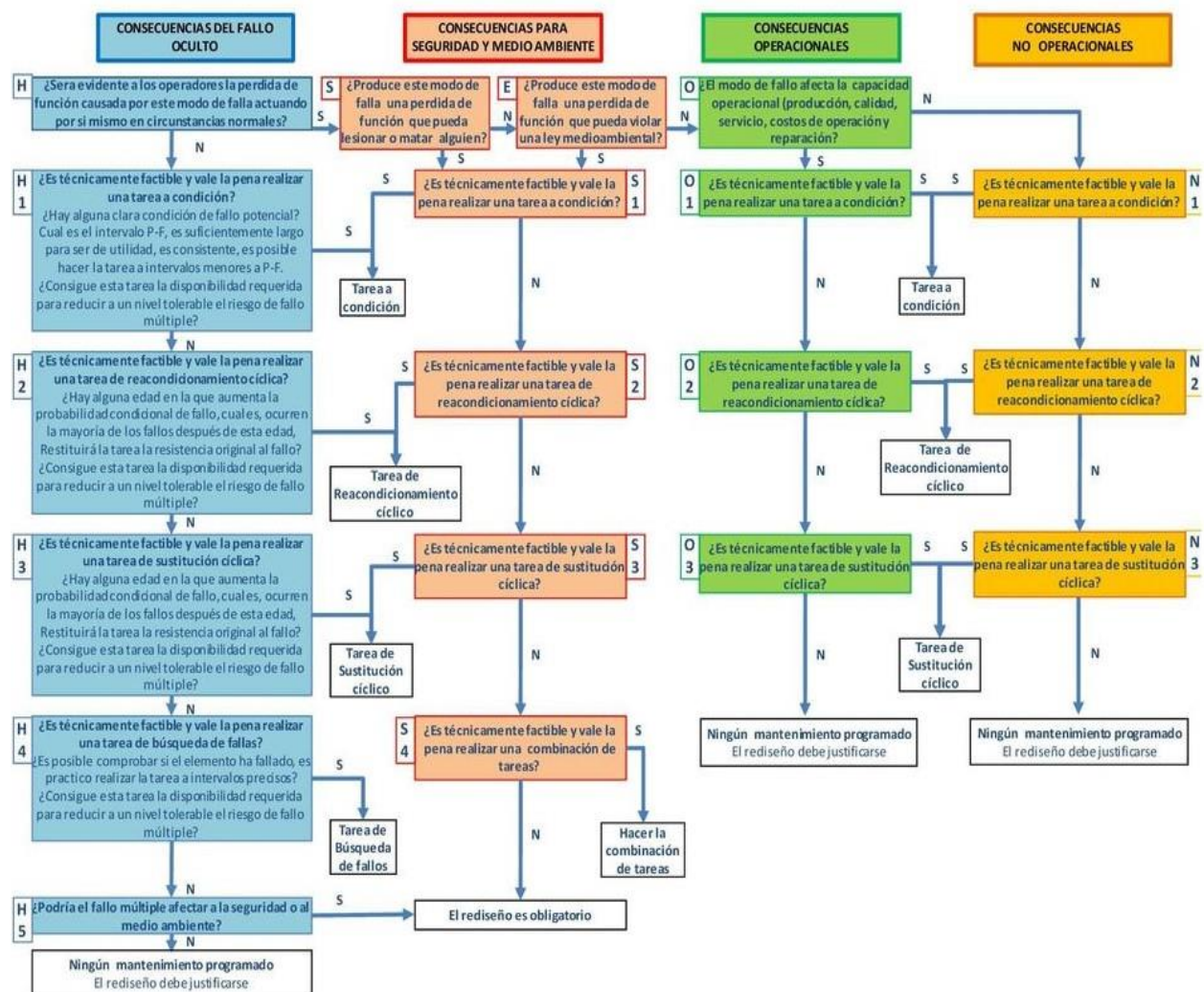
H4: ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de búsqueda de fallos?

H5: ¿Podría el fallo múltiple afectar a la seguridad o el medioambiente?

S4: ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una combinación de tareas?

Figura 2.11

Diagrama de Decisiones de R.C.M.



Nota. Tomado de *Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)* (SAE J1739; SAE International, 2021).

Para cada fallo de función establecido en la figura 2-11. “Se recorre el diagrama de decisiones desde la parte superior izquierda hacia la parte derecha y hacia abajo respondiendo a las preguntas planteadas en dicho diagrama” (Moubray, 1997).

2.6.1 Actividades de mantenimiento

Como se mencionó anteriormente, el diagrama de decisiones nos entrega las actividades correspondientes a cada modo de falla analizado. Estas actividades se centran en mantenimientos reactivos y preventivos. Las actividades preventivas tendrán que clasificarse en:

- Actividades de sustitución cíclicas: estas corresponden a las tareas que deberán ser realizadas en un intervalo de tiempo fijo. Estas se aplican solo cuando hay un patrón de desgaste, por lo que se deberá escoger la tarea preventiva correcta a la situación para no cambiar por piezas nuevas o que no tengan desgaste.
- Actividades programadas predictivas o sujetas a condición: estas son actividades que permiten encontrar fallas antes de que estas sucedan, a través de actividades de revisiones, análisis y monitoreo.

Las actividades reactivas corresponderán, como se mencionó anteriormente, a las actividades no programadas post-falla que afectaran las funciones del equipo.

Para la aplicación de las decisiones del diagrama de flujo y las actividades a realizar, se llenará una hoja con la información correspondiente a cada modo de falla. Véase en la Figura 2.12 y 2.13.

2.6.2 Resultados de F.M.E.C.A fallas totales

Figura 2.12

F.M.E.C.A Fallas Totales

TIPOS DE FALLAS	MODO DE FALLA	EVIDENTE	AFECTA SHA	EFFECTO DE FALLA	FF (MENSUAL)	TIEMPO DE REPARACION (HORAS)	MTTR (HORAS)	IMP. PROD. CLP/HR	COSTOS DIRECTOS POR FALLA CLP/FALLA	IMP. SEG.	IMP. AMB	RIESGO CUANTITATIVO CLP/AÑO	II	III	II2	II3	II4	II5	S	SI	S2	S3	S4	E	O	O1	O2	O3	N1	N2	N3	ACTIVIDAD MITO	TIPO DE MANTENIMIENTO
FALLA TOTAL	Desgaste o fallo de la boquilla de underflow (salida concentrada)	SI	SI	Cambio de densidad del underflow, sobrecarga en bombas de descarga, pérdidas de producto.	6	36	6	\$ 437.500	\$ 159.396.040	A	A	\$ 972.126.241	NO						NO					NO	SI	SI	SI					Tarea de sustitución cíclica	Preventivo (sustitución)
	Desgaste diferencial en la zona de vórtice (vortex Finder erosión)	NO	SI	Cambio en recirculación interna, pérdida de clasificación, mayores finos en underflow.	3	36	12	\$ 437.500	\$ 110.247.030	A	A	\$ 346.491.090	NO						NO					NO	SI	SI	SI					Tarea de reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)
	Deformación por sobrepresión interna (bulging)	SI	SI	Alteración geométrica, pérdida de eficiencia y tensiones en soldaduras.	2,5	6	2,4	\$ 437.500	\$ 17.061.679	A	A	\$ 45.279.196	NO						SI	SI	SI	SI		NO								Tarea a condición + rediseño si recurrente	Preventivo (protecciones)
	Desalineación / fallo estructural de carcasa o soportes	SI	SI	Vibraciones, fugas, falla mecánica mayor y posible parada.	1,5	36	24	\$ 437.500	\$ 16.180.421	A	A	\$ 40.020.632	NO						NO					NO	SI	SI	SI					Tarea a condición	Preventivo (inspecciones)
	Ostrucción / taponamiento por material (plugging)	SI	SI	Pérdida de rendimiento, fluctuaciones de caudal, paradas por bloqueo.	1,5	12	8	\$ 437.500	\$ 12.084.993	A	A	\$ 23.377.490	NO						NO	SI				NO	SI	SI	SI					Tarea a condición	Predictivo / a condición
	Rotura/aglomeración del medio filtrante (pérdida de integridad)	SI	SI	Pasa material sólido al permeado, contaminación del producto, daño a bombas aguas abajo.	1	12	12	\$ 437.500	\$ 6.439.539	C	C	\$ 11.689.539	NO						SI	SI	SI	SI		NO								Tarea de sustitución cíclica o rediseño	Preventivo (sustitución/rediseño)

Nota. Elaboración propia

2.6.3 Resultados de F.M.E.C.A fallas parciales

Figura 2.13

F.M.E.C.A Fallas Parciales

TIPO	MODO DE FALLA	EVIDENTE	AFECTA SHA	EFFECTO DE FALLA	FF (MENSUAL)	TIEMPO DE REPARACION (HORAS)	MTTR (HORAS)	IMP. PROD. CLP/HR	COSTOS DIRECTOS POR FALLA CLP/FALLA	IMP. SEG.	IMP. AMB	RIESGO CUANTITATIVO CLP/AÑO	H	II	III	IV	V	S	SI	S2	S3	S4	E	O	O1	O2	O3	N1	N2	N3	ACTIVIDAD MTTO	TIPO DE MANTENIMIENTO	
FALLA PARCIAL	Desgaste simétrico del cono (pérdida de eficiencia)	NO	SI	Reducción en separación; pérdida de clasificación; aumento de sólidos en overflow/underflow.	1	24	24	\$ 437.500	\$ 11.606.846	C	A	\$ 22.106.846	NO					NO					NO	SI	SI	SI						Reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)
	Obstrucción (clogging) del medio filtrante	SI	SI	Caída de caudal, aumento de presión diferencial, reducción de producción.	3	10	3,33333333	\$ 437.500	\$ 4.126.258	A	A	\$ 16.753.773	NO					NO					NO	SI	SI	SI						Tarea a condición	Predictivo / a condición
	Desgaste de válvula de cierre flujo	NO	SI	Cambio en patrón de flujo, pérdida de eficiencia y mayor paso de partículas gruesas al overflow.	3	16	5,33333333	\$ 437.500	\$ 2.845.350	C	A	\$ 15.536.051	NO					NO					NO	SI	SI	SI						Tarea de reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)
	Cavitación interna / inestabilidad hidrodinámica	SI	SI	Pérdida de eficiencia, pitidos/ruido, daño acelerado a superficies internas.	1	6	6	\$ 437.500	\$ 11.581.402	C	A	\$ 14.206.402	NO					SI	SI	SI	SI		NO									Mantenimiento basado en condición operativa (CBM)	Preventivo (condición de operación)
	Rotura o desgaste del vástago/torre de sujeción interna	NO	SI	Movimiento interno de componentes, reducción de separación, posible bloqueo.	2	12	6	\$ 437.500	\$ 3.150.769	C	C	\$ 11.551.538	NO					SI	SI				NO									Tarea a condición	Preventivo (inspecciones)
	Desbalance hidrodinámico por alimentación desigual (inlet mal distribuido)	NO	SI	Pérdida de eficiencia, aumento de desgaste en un sector, vibraciones.	4	8	2	\$ 437.500	\$ 1.000.000	C	C	\$ 7.500.000	NO					NO					NO	SI	SI	SI						Tarea de reacondicionamiento cíclico	Preventivo (ajustes de proceso)
	Fuga en juntas / bridas (sellado defectuoso)	SI	SI	Pérdidas de producto, contaminación de área, riesgo de caída de material.	2	8	4	\$ 437.500	\$ 1.283.888	C	A	\$ 6.067.776	NO					SI	SI				NO									Tarea a condición	Preventivo (inspecciones)
	Corrosión química del liner o sellos	NO	SI	Fallo de apertura/cierre, detención de proceso de lanzamiento, acumulación o caída de sacos.	0,5	12	24	\$ 437.500	\$ 400.000	C	A	\$ 5.450.000	NO					NO					NO	SI	SI	SI						Tarea de sustitución cíclica	Preventivo (sustitución)

Nota. Elaboración propia

2.7 SHA

El objetivo de evaluar y priorizar los distintos modos de falla asociados al equipo o sistema analizado, se desarrolló un Análisis SHA como ejemplo de la Figura 2.14, herramienta que permite representar gráficamente el nivel de criticidad de cada modo de falla considerando tres dimensiones:

- S (Severidad): impacto potencial del modo de falla.
- H (Hallazgo): nivel de capacidad para detectar o identificar la falla.
- A (Aparición): probabilidad o frecuencia con que ocurre el evento.

A partir de estas escalas se genera una matriz cruzada de priorización, donde los modos de falla se ubican en zonas de distinto color según su nivel de riesgo:

- Zona Roja (Alta criticidad): requiere acción inmediata.
- Zona Amarilla (Criticidad media): requiere monitoreo y medidas de control.
- Zona Verde (Baja criticidad): control adecuado, acciones de rutina.

Figura 2.14

SHA

SHA			
	C	B	A
A	2	3	3
B	1	2	3
C	1	1	2

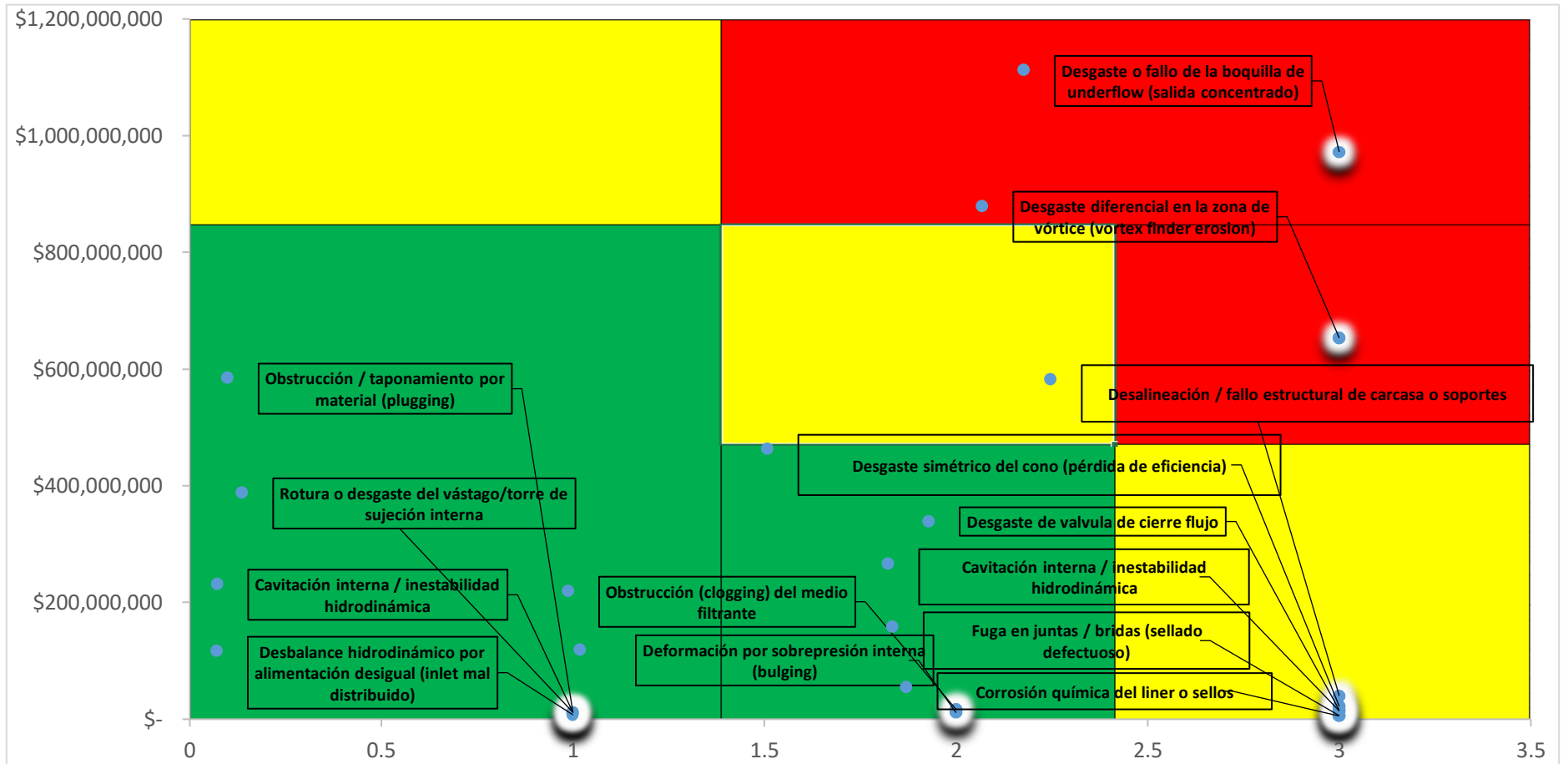
Nota. Elaboración propia basada en ISO 14224 (ISO, 2016).

A continuación, se presentan el grafico SHA, véase en la Figura 2.15 los modos de falla del sistema de la batería de hidrociclones como se agrupan cuantitativamente en la matriz de criticidad (SHA).

2.7.1 Presentación del gráfico SHA

Figura 2.15

Matriz de Criticidad de Fallas del Sistema de batería Hidrociclones (SHA)



Nota. Elaboración propia.

el resultado del análisis realizado sobre los distintos modos de falla identificados en el sistema proporciona una visión clara y estructurada del nivel de criticidad asociado a cada falla, lo que nos permite:

- Identificar aquellos modos de falla que requieren acciones correctivas inmediatas.
- Reconocer fallas de riesgo medio que deben ser monitoreadas y controladas.
- Determinar modos de falla de baja criticidad, actualmente bajo manejo adecuado.

Para facilitar la interpretación, los resultados se representan mediante un gráfico SHA, en el cual cada modo de falla se ubica en zonas de riesgo codificadas por colores (verde, amarillo y rojo). Como se visualiza en la Figura 2.15, esta representación permite comparar de forma rápida el nivel de criticidad entre los distintos modos de falla, así como su impacto cuantitativo en términos de riesgo (CLP/año). En las secciones siguientes se detallan los resultados obtenidos.

Las bases teóricas presentadas en este capítulo proporcionan el sustento metodológico necesario para la aplicación del RCM II en concordancia con los criterios de SAE JA1011 y las orientaciones de SAE JA1012, esto permite que el análisis FMECA aborde los modos de falla identificados, clasificar sus consecuencias y justificar técnicamente el diagnóstico y avanzar en el cumplimiento del Objetivo Específico 2.

En este contexto, en el Capítulo 3 se desarrollará la aplicación práctica de estas metodologías, mediante el análisis detallado de los modos de falla, su evaluación de criticidad y la definición de estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

Capítulo 3: Propuesta de Plan de Mantenimiento Basado en RCM II y F.M.E.C.A.

3.1 Diagnóstico de los Modos de Falla mediante F.M.E.C.A. y Análisis SHA

El análisis F.M.E.C.A. desarrollado para la batería de hidrociclones permitió identificar y cuantificar los modos de falla más relevantes en términos de severidad, probabilidad de ocurrencia y detectabilidad (Stamatis, 2003; Mobley, 2002). Esta evaluación fue posteriormente complementada con la metodología SHA (Severidad – Hallazgo – Aparición), lo que evidenció que los principales modos de falla están asociados al desgaste progresivo de componentes críticos, tales como el ápex y el vortex finder, los cuales cumplen un rol fundamental en el proceso de clasificación de partículas.

La clasificación de un hidrociclón depende del equilibrio entre la fuerza centrífuga y la fuerza de arrastre, tal como lo describe la ley de Stokes. En condiciones ideales, este equilibrio permite que las partículas gruesas migren hacia la periferia y sean descargadas por el ápex, mientras que las partículas finas son transportadas hacia el overflow.

Los resultados combinados muestran que un grupo reducido de modos de falla concentra la mayor parte del riesgo operacional y económico, afectando directamente la eficiencia de clasificación, la disponibilidad de la batería y la estabilidad del proceso aguas abajo (Wills & Finch, 2016). En particular, los modos de falla críticos identificados fueron:

- Desgaste o falla del ápex (underflow): asociado a pérdidas de control en el diámetro efectivo, variabilidad en la presión y cambios no deseados en el tamaño de corte.
- Erosión del vortex finder: que disminuye la eficiencia hidráulica interna, provoca cortocircuito de finos y aumenta la carga circulante.
- Desalineación y fallas estructurales: en el cuerpo del hidrociclón o en su montaje, que generan fugas, vibraciones anormales y pérdida de presión.

- Obstrucción o plugging: resultado de material grueso o aglomerados que interrumpen el flujo interno, generando desbalance en la batería y detenciones no programadas.
- Desgaste simétrico del cono: que reduce el perfil geométrico interno, disminuye el rendimiento y deforma la curva de clasificación.

Estos modos de falla representan más del 70% del costo anual de mantenimiento y son responsables de degradaciones significativas en el desempeño operacional (Mobley, 2002), tales como:

- Reducción de la presión de operación efectiva.
- Disminución de la eficiencia de corte (d_{50}) y aumento del bypass de finos.
- Variabilidad operacional entre ciclones activos.
- Pérdida de disponibilidad y mayor frecuencia de intervenciones correctivas.

La combinación de ambos análisis permite explicar las desviaciones observadas en los indicadores operacionales, tales como la disminución en la relación arenas/lamas, el incremento de material fino en la descarga inferior y la pérdida de presión del sistema. Estos efectos evidencian un deterioro progresivo del desempeño del equipo, coherente con los niveles de criticidad obtenidos en el análisis F.M.E.C.A.

Debido a la elevada concentración de riesgo cuantitativos del análisis SHA en los modos de falla identificados, resulta fundamental desarrollar un plan de mantenimiento específico y orientado a condición (Moubray, 1997), capaz de abordar de manera directa las causas que afectan el desempeño de la batería de hidrociclones.

Este enfoque permite reducir la ocurrencia de fallas derivadas del desgaste erosivo, fortaleciendo simultáneamente la capacidad de detección temprana mediante inspecciones estructuradas y técnicas predictivas que proporcionan información confiable sobre el estado interno de los componentes. Al mismo tiempo, la planificación anticipada de las intervenciones contribuye a optimizar los tiempos de mantenimiento, disminuyendo las detenciones no programadas y mejorando la continuidad operativa del proceso. A través de estas acciones es posible extender la vida útil de elementos críticos como el ápex y el vortex finder, garantizando la estabilidad hidráulica del sistema y, en consecuencia, una mayor disponibilidad y eficiencia en la clasificación de arenas y lamas.

En conjunto, este plan representa una estrategia integral que transforma la gestión del mantenimiento desde un enfoque reactivo hacia uno predictivo, más seguro, eficiente y alineado con los objetivos de confiabilidad de la planta (Moubray, 1997; Smith & Hinchcliffe, 2004).

En este contexto, la aplicación conjunta del análisis F.M.E.C.A y la metodología SHA constituyen al enfoque del RCM II. En concordancia con SAE JA1011 y SAE JA1012, estos modos de falla serán evaluados considerando sus efectos, sus consecuencias, su detección y la existencia de tareas técnicamente factibles y económicamente convenientes. Los cuales tienen un impacto directo en la confiabilidad y el desempeño operacional, sobre esta base, se establecen las estrategias de mantenimiento propuestas, dando cumplimiento al objetivo específico 2 y orientando la gestión hacia un enfoque predictivo y preventivo que permite mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la batería de hidrociclones.

3.2 Matriz R.C.M.

A partir del análisis conjunto F.M.E.C.A. y SHA se identificaron los modos de falla críticos que afectan el desempeño, la disponibilidad y los costos operativos de la batería de hidrociclones, mediante la aplicación del árbol de decisiones del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (R.C.M. II), en alineación con los criterios de SAE JA1011 y con las orientaciones de SAE JA1012, con el propósito de evaluar cada modo de falla en función de sus consecuencias operacionales, su detectabilidad y la existencia de acciones preventivas técnica y económicamente viables. Este proceso permitió transformar el análisis de fallas en un plan de mantenimiento estructurado, donde cada tarea responde a una justificación basada en confiabilidad: preservar la función del equipo, reducir riesgo operativo y optimizar recursos.

La matriz presentada a continuación contempla todas las decisiones tomadas durante el proceso R.C.M. II detallando, el tipo de tarea seleccionada: sustitución cíclica, reacondicionamiento, tareas a condición, predictivas o correctivas, frecuencia de aplicación: definida según criticidad, tasa de desgaste y comportamiento histórico, recursos humanos requeridos: horas/hombre por especialidad. Insumos, materiales y servicios necesarios: asociados a cada intervención, costos totales anuales estimado: considerando mano de obra, materiales y frecuencia.

El Plan Maestro de Mantenimiento (PPM) basado en Confiabilidad para la batería de hidrociclones representa una herramienta clave para la planificación, programación y control de las actividades de mantenimiento como se desarrolla en la Figura 3.1 y 3.2. Su aplicación permitirá disminuir la ocurrencia de fallas recurrentes, mejorar la disponibilidad del sistema y asegurar la continuidad operacional del proceso.

3.2.1 Presentación PPM fallas totales

Figura 3.1

PPM Fallas Totales

Tipos de Fallas	Modo de falla	Actividad Mto	Tipo de mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de aplicación (mensual)	Técnico instrumentista	Operador	Mecánico	Mecánico especialista	Mecánico de mantenimiento	Técnico predictivo (vibraciones)	HH Aplicadas (Horas)	Cargo	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	Tarifa especialidad	PTTO ANUAL
FALLA TOTAL	Desgaste o fallo de la boquilla de underflow (salida concentrada)	Tarea de sustitución cíclica	Preventivo (sustitución)	Medir apertura/flujo; reemplazar boquilla; controlar granulometría/consistencia para prolongar vida.	2	2	2	4	1	2		24	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador / Mecánico especialista/ Mecánico mantenimiento	Boquilla de repuesto, herramientas, calibrador, juntas, EPP, registro de mantenimiento.	600.000	3.308.251	159.396.040
	Desgaste diferencial en la zona de vórtice (vortex finder erosion)	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)	Inspección visual; recubrimiento o cambio de vortex finder; registro de vida útil por tonelaje.	2	2	2	4	1	2		24	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador / Mecánico especialista/ Mecánico mantenimiento	Inserto nuevo, sellos, pernos, equipo de izaje, alineador, EPP.	600.000	3.308.251	159.396.040
	Desalineación / fallo estructural de carcasa o soportes	Tarea a condición	Preventivo (inspecciones)	Inspección estructural/NDT; realinear; reforzar soportes; ejecutar RCA y rediseñar si se repite.	2	1	1	4	1	2		12	Técnico instrumentista/ Operador / Mecánico especialista/ Mecánico mantenimiento	Máquina de soldar, electrodos, planchas de refuerzo, pernos, herramientas de izaje, EPP completo.	800.000	1.281.702	31.560.842
	Obstrucción / taponamiento por material (plugging)	Tarea a condición	Predictivo / a condición	Limpiar o soplar conductos cuando ΔP o caudal indiquen taponamiento; purgas y limpieza programada.	3	1	1	4				12	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador	Llaves, cepillos, químicos desincrustantes, trapos industriales, EPP completo.	150.000	994.583	35.954.979
	Deformación por sobrepresión interna (bulging)	Tarea a condición + rediseño si recurrente	Preventivo (protecciones)	Instalar/chequear alivio de presión; inspección dimensional; prueba hidráulica; rediseñar espesor o anclajes.	1	1	1			2		20	Técnico instrumentista/ Operador/ Mecánico mantenimiento	Máquina de soldar, placas de refuerzo, electrodos, pernos, equipo de izaje, planos, EPP completo.		853.084	17.061.679
	Rotura/aglomeración del medio filtrante (pérdida de integridad)	Tarea de sustitución cíclica o rediseño	Preventivo (sustitución/rediseño)	Reemplazar medio filtrante; ajustar química y presiones; rediseñar sujeción/selección de material si ocurre nuevamente.	1	1	1	2				12	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador	Elemento filtrante reforzado, ferretería, herramientas de izaje, planos, EPP completo.	600.000	486.628	6.439.539

Nota. Elaboración propia.

3.2.2 Presentación PPM fallas parciales

Figura 3.2

PPM Fallas Parciales

Tipos de Fallas	Modo de falla	Actividad Mto	Tipo de mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de aplicación (mensual)	Técnico instrumentista	Operador	Mecánico	Mecánico especialista	Mecánico de mantenimiento	Técnico predictivo (vibraciones)	HH Aplicadas (Horas)	Cargo	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	Tarifa especialidad	PTTO ANUAL
FALLA PARCIAL	Desgaste simétrico del cono (pérdida de eficiencia)	Reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)	Inspección periódica; medición de espesor (UT); revestir o reemplazar el cono por horas de servicio.	2	1	1	2	1		1	12	Técnico instrumentista/ Operador/ Mecánico especialista/ Técnico predictivo	Cono nuevo o recubierta, herramientas de izaje, sellos, pernos, alineador láser, EPP completo.	500.000	925.571	22.713.692
	Obstrucción (chugging) del medio filtrante	Tarea a condición	Predictivo / a condición	Retrolavado o limpieza cuando AP suba; purga de sólidos; dosificar anticrustantes.	1	1	1	2				10	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador	Medio filtrante nuevo, herramientas manuales, bomba auxiliar, sellos, EPP completo.		412.626	4.126.258
	Desgaste de válvula de cierre flujo	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)	Medir diámetro/espesor; reemplazar boquilla o liner a intervalo definido; registrar horas/tonelaje.	1	1	1	2				8	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador	Boquillas, sellos, pernos, EPP	250.000	324.419	2.845.350
	Cavitación interna / inestabilidad hidrodinámica	Mantenimiento basado en condición operativa (CBM)	Preventivo (condición de operación)	Verificar NPSH/presión; revisar válvulas y bombas; ajustar causal; monitorear vibración/ruído.	1	1	1	2			1	16	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador / Técnico predictivo	Repuestos hidráulicos (rodetes, difusores), equipo de izaje, sellos, juntas, EPP, asistencia técnica.	1.200.000	648.838	11.581.402
	Rotura o desgaste del vástago/torre de sujeción interna	Tarea a condición	Preventivo (inspecciones)	Inspección visual/NDT; reemplazo del vástago; asegurar sujeciones; rediseñar geometría/material si falla se repite.	1	1	1	2		2		16	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador / Mecánico mantenimiento	Vástago nuevo, pernos/tuercas, alineador láser, equipo de izaje, sellos, EPP completo.		196.923	3.150.769
	Desbalance hidrodinámico por alimentación desigual (inlet mal distribuido)	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Preventivo (ajustes de proceso)	Balancear flujo; limpiar manifold/inlets; calibrar válvulas; verificación periódica de distribución.	1				2		1	16	Mecánico especialista/ Técnico predictivo	Piping nuevo o secciones de reemplazo, planos, herramientas de corte y soldadura, EPP completo.	1.000.000	607.179	1.000.000
	Fuga en juntas / bridas (sellado defectuoso)	Tarea a condición	Preventivo (inspecciones)	Inspección con termografía/infrarrojo; reapriete a torque; sustitución de empaques; prueba de estanqueidad.	1	1	1			2		3	Técnico instrumentista/ Operador/ Mecánico mantenimiento	Bomba de prueba/medios de ensayo, manómetro calibrado, solución jabonosa, tapas ciegas, EPP.	900.000	127.963	1.283.888
	Corrosión química del liner o sellos	Tarea de sustitución cíclica	Preventivo (sustitución)	Plan de cambio de liner/sellos; selección de material compatible; control de pH/temperatura.	1		1					16	Operador	Recubrimientos epóxicos o cerámicos, sellos, pernos, pistola de aplicación, EPP completo.	400.000	146.565	400.000

Nota. Elaboración propia.

3.3 Propuesta de Escenarios para Mejora

La evaluación del impacto técnico, operativo y económico del plan de mantenimiento basado en R.C.M., se desarrolló una propuesta de escenarios que permite comparar diferentes niveles de intervención sobre los modos de falla críticos identificados en el análisis F.M.E.C.A. y el SHA. Esta propuesta busca determinar cuál combinación de actividades preventivas, predictivas y correctivas ofrece la mejor relación costo–beneficio, asegurando al mismo tiempo la continuidad operativa y la confiabilidad del proceso de clasificación.

Los escenarios planteados representan alternativas graduales de implementación, desde la situación actual hasta un plan ampliado que abarca la totalidad de los modos de falla de mayor criticidad. Cada escenario incorpora un conjunto específico de actividades de mantenimiento, recursos y costos asociados, permitiendo cuantificar:

- El costo total anual de mantenimiento.
- La reducción de fallas críticas y de intervenciones correctivas.
- La evolución del MTBF y MTTR.
- La disminución de horas de detención no programada.
- El impacto en la disponibilidad, la eficiencia hidráulica y la estabilidad del proceso.

Esta estructuración en escenarios posibilita una evaluación comparativa objetiva, en la cual es posible observar cómo el incremento controlado de mantenimiento preventivo y predictivo genera una disminución significativa del correctivo y de las pérdidas de producción. A partir de esta comparación, se determinan los beneficios netos de cada alternativa y se identifica el nivel óptimo de intervención para la batería de hidrociclones.

3.3.1 Parámetros económicos y operacionales utilizados

Es necesario establecer previamente los parámetros económicos y operacionales que servirán como base para los cálculos de costo, productividad y eficiencia. Estos valores permiten determinar el costo real de la mano de obra por especialidad, estimar el impacto económico de las detenciones no programadas y cuantificar los beneficios derivados de la reducción de fallas críticas.

Los parámetros presentados consideran sueldos promedio, costo por hora-hombre (HH), horas mensuales disponibles, tasa de producción y valor económico de las arenas finas véase en la Tabla 3.1 y 3.2. Estos datos permiten realizar una evaluación económica consistente y representativa de la realidad operacional del proceso.

Tabla 3.1

Sueldos de las Especialidades

Especialidad	Sueldo (CLP)	HH (CLP/Hr)	Horas/mes
Técnico Instrumentista	1.400.000	10.938	128
Mecánico Especialista	1.600.000	12.308	130
Operador	1.200.000	9.160	131
Mecánico	1.350.000	10.227	132
Mecánico de Mantenimiento	1.500.000	11.278	133
Técnico predictivo PDM (vibraciones / UT)	1.800.000	13.333	135

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.2

Valor de Producción

Parámetro	Valor
Arenas Finas (CLP/Ton)	70.000
Tasa de Producción (Ton/Hr)	100
Eficiencia Global	0,0625

Nota. Elaboración propia.

3.3.2 Escenario 1

El Escenario 1 presenta los dos modos de fallas con mayor peso cuantitativo dentro del análisis F.M.E.C.A.–SHA. Estos dos modos de falla son: Desgaste o fallo de la boquilla de underflow (salida concentrada) y Desgaste diferencial en la zona de vórtice (vortex Finder erosión), concentran el mayor porcentaje de ocurrencia, severidad y costos correctivos del sistema, representando una parte significativa de las horas de detención no programada y de las pérdidas operacionales anuales.

El Escenario 1 plantea una intervención focalizada, donde se aplican actividades preventivas, predictivas y paradas programadas de reemplazo de componentes sobre estos dos componentes críticos. Este enfoque permite evaluar el beneficio obtenido al actuar sobre la fracción más impactante del problema, sin incorporar aún el resto de los modos de falla de criticidad media o estructural. La intención es determinar si una mejora dirigida y de menor inversión inicial puede generar reducciones apreciables en:

- los costos correctivos anuales,
- la frecuencia de fallas funcionales,
- las horas de indisponibilidad del sistema,
- y los impactos negativos en la eficiencia del proceso de clasificación.

Este escenario representa una alternativa de mejora de bajo costo relativo, pero con un potencial considerable de aumento del MTBF y disminución del MTTR, ya que aborda los componentes que más contribuyen al deterioro operativo de la batería de hidrociclones.

A continuación, se presenta en la Figura 3.3 el escenario 1, donde se analizan los resultados técnicos y económicos de intervenir únicamente los dos modos de falla más relevantes identificados en el análisis cuantitativo.

Figura 3.3

Escenarios 1

FALLAS TOTALES	MODO DE FALLA	ACTIVIDAD MTTO	TIPO DE MTTO	ACCIÓN A EJECUTAR	FRECUENCIA DE APLICACIÓN (MENSUAL)	TÉCNICO INSTRUMENTISTA	OPERADOR	MECÁNICO	MECÁNICO ESPECIALISTA	MECÁNICO DE MANTENIMIENTO	TÉCNICO PREDICTIVO (VIBRACIONES)	HH APLICADAS (HORAS)	CARGO	INSUMOS, MATERIALES, O SERVICIOS REQUERIDOS	VALOR INSUMO	TARIFA ESPECIALIDAD	PTTO ANUAL	HH PTTO	MO	HRS EJECUCIÓN CON PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN
Fallas totales	Degraste o fallo de la boquilla de underflow (salida concentrada)	Tarea a condición	Predictivo / a condición	Medir apertura/flujo; reemplazar boquilla; controlar granulometría/co nsistencia para prolongar vida.	2	2	2	4	1	2		24	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador / Mecánico especialista/ Mecánico mantenimiento	Boquilla de repuesto, herramientas, calibrador, juntas, EPP, registro de mantenimiento.	\$ 600.000	\$ 3.308.251	\$ 159.396.040	24	\$ 6.817.141.895	24
			Predictivo	Realizar análisis de espesores por ultrasonido	0,3	2	2				1	12	Técnico predictivo PDM / Técnico instrumentista / operador	Medidor de vibraciones Medidor de espesores UT industrial Cámara endoscópica/barosco pio.	\$ 7.600.000	\$ 458.597	\$ 9.250.950	1,2	\$ 1.840.507	0
			Preventivo	Sustitución programada de boquilla.	0,5					2		12	Mecánico mantenimiento	Boquilla de repuesto, herramientas, calibrador, juntas, EPP, registro de mantenimiento.	\$ 1.500.000	\$ 160.000	\$ 2.460.000	4	\$ 5.813.333	0
			Correctivo	Reemplazo inmediato por pérdida de control del flujo ápex Medir apertura/flujo; reemplazar boquilla; controlar granulometría/co nsistencia para prolongar vida.	1,5	1	1	2		2		12	Técnico instrumentista/ Operador / Mecánico mantenimiento	Kit recubrimiento (cerámico/epóxido), repuesto parcial, herramientas, EPP.	\$ 600.000	\$ 822.930	\$ 15.412.738	18	\$ 1.653.775.728	6
	Degraste diferencial en la zona de vórtice (vortex Finder erosión)	Tarea de recondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)	Inspección visual; recubrimiento o cambio de vortex Finder; registro de vida útil por tonelaje.	1,5	2	2	4	1	2		24	Técnico instrumentista/ Mecánico / Operador / Mecánico especialista/ Mecánico mantenimiento	Inserto nuevo, sellos, pernos, equipo de izaje, alineador, EPP.	\$ 600.000	\$ 3.045.751	\$ 110.247.030	36	\$ 7.766.275.503	24
			Predictivo	Realizar análisis de espesores por ultrasonido	0,3	2	2				1	12	Técnico predictivo PDM / Técnico instrumentista / operador	Medidor de vibraciones Medidor de espesores UT industrial Cámara endoscópica/barosco pio.	\$ 7.600.000	\$ 458.597	\$ 9.250.950	1,2	\$ 3.500.634	0
			Preventivo	Sustitución programada de boquilla.	0,5					2		12	Mecánico mantenimiento	Boquilla de repuesto, herramientas, calibrador, juntas, EPP, registro de mantenimiento.	\$ 1.500.000	\$ 147.692	\$ 2.386.154	4	\$ 31.150.769	0
			Correctivo	Reemplazo inmediato por pérdida de control del flujo ápex	1,5	1	1	2		2		12	Técnico instrumentista/ Operador / Mecánico mantenimiento	Kit recubrimiento (cerámico/epóxido), repuesto parcial, herramientas, EPP.	\$ 600.000	\$ 822.930	\$ 15.412.738	24	\$ 3.092.445.739	12

Nota. Elaboración propia.

El Escenario 1 demuestra que una intervención focalizada en los dos modos de falla más críticos permite una reducción significativa del costo correctivo y una mejora directa en la disponibilidad del sistema. No obstante, aún persisten fallas recurrentes en componentes estructurales y de operación que no se abordan en este nivel de intervención. Por ello, se plantea un segundo escenario para abarcar mayores fallas cuantitativas por debajo del escenario 1.

3.3.3 Escenario 2

Tras evaluar los beneficios de intervenir solo los dos modos de falla más críticos, se amplía el análisis hacia una alternativa de mayor alcance. El Escenario 2 incorpora los tres modos de falla siguientes en importancia, definidos por su severidad, recurrencia e impacto operacional según el F.M.E.C.A.–SHA.

- Desalineación o fallo estructural de carcasa o soportes (falla total): asociado a pérdidas de presión, fugas, vibraciones anómalas y riesgo de detenciones completas de la batería.
- Obstrucción o taponamiento por material (plugging) (falla total): que genera bloqueos internos, variaciones abruptas de presión y salidas fuera de especificación, obligando a detenciones no programadas.
- Desgaste simétrico del cono (falla parcial): que provoca pérdida gradual de eficiencia, deformación del flujo y aumento del bypass de finos.

Representan una proporción relevante del deterioro operativo de la batería y son responsables de una parte significativa de las fallas de tipo estructural, hidráulico y geométrico del sistema. Su inclusión en este escenario permite evaluar un nivel de intervención más robusto, orientado a:

- reducir las detenciones completas generadas por fallas estructurales y plugging,
- controlar el desgaste progresivo de zonas primarias del ciclón,
- estabilizar las curvas de clasificación y el comportamiento hidráulico,
- y mejorar la disponibilidad operacional de la batería en un horizonte más amplio.

El Escenario 2 como se muestra en la Figura 3.4, por tanto, busca determinar los beneficios adicionales del mantenimiento preventivo y predictivo a los modos de falla que siguen en criticidad, permitiendo comparar su impacto frente al Escenario 1 y frente a la situación actual (Escenario 0).

A continuación, se presentan los resultados técnicos y económicos asociados a esta alternativa de intervención ampliada.

Figura 3.4

Escenarios 2

Fallas totales	Modo de falla	Actividad Mto	Tipo de mantenimiento	Acción a ejecutar	Frecuencia de aplicación (mensual)	Técnico instrumentista	Operador	Mecánico	Mecánico especialista	Mecánico de mantenimiento	Técnico predictivo (vibraciones)	HH Aplicadas (Horas)	Cargo	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	Insumos, Materiales, o servicios requeridos	Tarifa especialidad	PTTO ANUAL	Horas ejecución plan preventivo	MO	HRS EJECUCIÓN CON PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN
Fallas totales	Desalineación / fallo estructural de carcasa o soportes	Tarea de sustitución cíclica	Preventivo (sustitución)	Medir apertura/flujo; reemplazar boquilla; controlar granulometría/consistencia para prolongar vida.	2	1	1	4	1	2		12	Técnico instrumentista/Operador/Mecánico/Mecánico especialista/Mecánico de mantenimiento	Máquina de soldar, electrodos, planchas de refuerzo, pernos, herramientas de taje, EPP completo.	800.000	1.281.702	31.560.842	24	6.817.141.895	24
			Predictivo	Controlar rendimiento y caudal de descarga; comparar densidad con curva estándar.	0,3	2	2				1	4	Mecánico / operador/Técnico predictivo	Acelerómetro, sensor de vibración, software de análisis FFT, registro de tendencia.	200.000	152.866	383.439	1,2	1.840.507	0
			Preventivo	Medición ultrasónica de espesor del cono; reemplazo o recubrimiento a intervalos definidos.	0,5					2		8	Técnico de mantenimiento	Equipo UT o LP, calibrador, nivel láser, registro de alineación, gel acoplante.	300.000	106.667	726.667	4	5.813.333	0
			Correctivo	Sustituir sección desgastada o el cono completo; realinear la carcasa.	1,5	1	1	2		2		12	Operador/Técnico instrumentista/Mecánico/Mecánico mantenimiento	Máquina de soldar, electrodos, planchas de refuerzo, pernos, herramientas de taje, EPP completo.	500.000	822.930	15.312.738	18	1.653.775.728	6
	Desgaste diferencial en la zona de vórtice (vortex finder erosion)	Tarea a condición	Preventivo (programado)	Inspección visual; recubrimiento o cambio de vortex finder; registro de vida útil por tonelaje.	3	1	1	4				12	Operador/Mecánico/Técnico instrumentista	Compresor o bomba HP, mangueras, válvulas de purga, bandejas de contención, EPP.	150.000	994.583	35.954.979	36	7.766.275.503	24
			Predictivo	Monitorear DP o caudal de salida; registrar alarmas por baja presión o sobrecarga.	0,3	2	2				1	4	Técnico instrumentista/Operador/Técnico predictivo	Sensor de presión diferencial calibrado, registrador digital o SCADA.	400.000	152.866	583.439	1,2	3.500.634	0
			Preventivo	Limpieza o purga programada de líneas; uso de aire o agua a presión.	0,5					2		8	Mecánico de mantenimiento	Compresor o bomba de alta presión, válvulas, mangueras, EPP.	3.500.000	98.462	3.893.846	4	31.150.769	0
			Correctivo	Desarme de la línea o cámara; eliminación del tapón y limpieza manual o química.	2	1	1	2		2		12	Técnico instrumentista/Operador/Mecánico/Mecánico de mantenimiento	Llaves, cepillos, químicos desincrustantes, trapos industriales, EPP completo.	150.000	888.555	21.475.318	24	3.092.445.739	12
Falla parcial	Desgaste simétrico del cono (pérdida de eficiencia)	Reacondicionamiento cíclico	Preventivo (programado)	Inspección visual; recubrimiento o cambio de vortex finder; registro de vida útil por tonelaje.	3	1	1	2	1			12	Técnico instrumentista/Operador/Mecánico/Mecánico especialista	Densímetro, caudalímetro, planilla de control, software SCADA.	400.000	896.821	32.685.539	36	5.883.396.952	24
			Predictivo	Monitoreo químico (pH, temperatura, concentración).	0,3	1	1				1	4	Mecánico / operador/Técnico predictivo	Linterna, espejo telescópico, EPP, hoja de inspección.	100.000	103.100	223.719	1,2	805.390	0
			Preventivo	Sustituir sellos o liner según plan; usar materiales resistentes.	0,5					2		8	Técnico de mantenimiento	Equipo de ultrasonido, gel acople, calibrador, registro digital.	1.500.000	90.226	1.860.902	4	14.887.218	0
			Correctivo	Cambiar piezas corroídas; aplicar recubrimiento o rediseñar material.	1,5	1	1	2		2		12	Operador/Técnico instrumentista/Mecánico/Mecánico mantenimiento	Poliuretano, Cerámica, Caucho anti abrasivo, Cono o liner de reemplazo compatible con el modelo del hidrociclón, sellos o empaques nuevos, Lubricantes o agentes de montaje, Material abrasivo para limpieza previa, Adhesivo Industrial para fijación de liners	600.000	822.930	15.412.738	18	1.664.575.728	6

Nota. Elaboración propia.

3.3.4 Comparación de escenarios y ahorro proyectado

Luego de definir los tres escenarios de intervención (Escenario 0, Escenario 1 y Escenario 2), es necesario realizar una comparación cuantitativa que permita medir el beneficio económico asociado a cada alternativa. Esta evaluación considera tanto los costos directos de mantenimiento (mano de obra, insumos y repuestos) como los costos indirectos derivados de las horas de detención no programada, pérdida de eficiencia y reducción de la producción de arenas finas.

El Escenario 0 representa la situación actual y se utiliza como línea base, caracterizada por un alto gasto correctivo y una elevada pérdida operacional. El Escenario 1 incorpora mantenimiento preventivo y predictivo focalizado en los dos modos de falla más costosos, permitiendo una disminución significativa de fallas y un ahorro relevante respecto a la situación actual. El Escenario 2 amplía la intervención a cinco modos de falla de mayor impacto, generando una reducción aún mayor en costos correctivos, horas de detención y pérdida de eficiencia del proceso.

Con el fin de seleccionar la alternativa más factible, se calcula el ahorro anual -esperado para cada escenario comparado con la situación base (Escenario 0) y la diferencia incremental entre Escenario 1 y Escenario 2. Esta comparación permitirá determinar cuál nivel de intervención ofrece la mejor relación costo-beneficio en términos técnicos, operacionales y económicos.

A continuación, se presenta la estimación del ahorro generado para cada escenario, vease en las Tabla 3.3 - 3.4 - 3.5 y 3.6.

Tabla 3.3

Valores de los Modos de Fallas del Escenario 1

	Valores PTTO		Valores PTTO
Total modo de falla 1	\$ 159.396.040	Total modo de falla 2	\$ 110.247.030
Total escenario 1	\$ 27.123.689	Total escenario 1	\$ 27.049.842
Ahorro	\$ 132.272.352	Ahorro	\$ 83.197.188

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4

Valor Total del Ahorro del Escenario 1

	Valores PTTO
Total general	\$ 269.643.070
Total escenario 1	\$ 54.173.531
Ahorro	\$ 215.469.539

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5

Valores de los Modos de Fallas del Escenario 2

	Valores PTTO		Valores PTTO		Valores PTTO
Total modo de falla 1	\$ 43.473.357	Total modo de falla 2	\$ 31.560.842	Total modo de falla 3	\$ 20.869.986
Total escenario 2	\$ 11.772.281	Total escenario 2	\$ 10.697.764	Total escenario 2	\$ 13.714.944
Ahorro	\$ 31.701.077	Ahorro	\$ 20.863.078	Ahorro	\$ 7.155.042

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6

Valor Total del Ahorro del Escenario 2

	Valores PTTO
Total general	\$ 95.904.185
Total escenario 2	\$ 36.184.989
Ahorro	\$ 59.719.196

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo evidencia que el Escenario 1 genera el mayor beneficio económico directo, con un ahorro estimado de \$264.618.549 respecto a la situación actual, debido a que interviene los dos modos de falla que concentran la mayor proporción de costos correctivos y detenciones no programadas. Por su parte, el Escenario 2, aunque incorpora un mayor número de modos de falla y mejora la cobertura preventiva del sistema, presenta un ahorro menor \$40.328.553, ya que aborda fallas de menor peso cuantitativo. En términos económicos, el Escenario 1 se posiciona como la alternativa de mayor ahorro de esta manera se reducen gastos de mantenimiento, mejora la disponibilidad operativa y confiabilidad.

3.3.5 Evaluación de indicadores operacionales y mejora proyectada

El impacto del escenario 1 cuenta con los principales indicadores de desempeño del sistema, tales como MTBF, MTTR, disponibilidad operativa, horas de detención, eficiencia global del proceso y confiabilidad. Estos indicadores permiten comparar objetivamente el comportamiento esperado del sistema frente a la condición actual, evidenciando las mejoras técnicas derivadas de la implementación del mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo programado.

Se estimó el efecto del escenario 1 sobre la frecuencia de fallas del sistema. Los modos de falla asociados al desgaste de ápex y a la erosión del vortex representan aproximadamente el 80 % del riesgo total. La aplicación de las tareas RCM II del Escenario 1 reduce el riesgo global en torno a un 76 %, se presenta la tabla de los indicadores del escenario 0 vs. el escenario 1.

Tabla 3.7

Impactos comparativos del escenario 0 y del escenario 1

Indicadores	Situación Actual	Situación Proyectada	Variación	Impacto Técnico Asociado
Frecuencia de fallas	Alta	Media	30 – 40 %	Implementación de mantenimiento preventivo/predictivo
Eficiencia de clasificación	Variable	Estable	5 – 10 %	Control de presión y desgaste en ápex/vortex
Consumo de repuestos críticos	Alto	Optimizado	20 – 30 %	Reemplazos programados y menor desgaste extremo
Costos mantenimiento correctivo	Alto	Bajo	25 – 40 %	Disminución de fallas imprevistas
Costos mantenimiento preventivo	Bajo	Medio	15 – 20 %	Mayor inversión planificada
Costo total de mantenimiento	Alto	Medio – Bajo	10 – 20 %	Balance entre preventivo y correctivo
Fallas totales	32 fallas/año	16 fallas/año	50%	Reducción de eventos no programados
MTBF promedio	270 h/falla	576 h/falla	113 h/falla	Mayor intervalo entre fallas
MTTR promedio	76,15 h	101,07 h	33%	Mayor tiempo de intervención
Tasa de falla λ	0,0037 fallas/h	0,00093 fallas/h	53%	Disminución de la probabilidad de falla
Confiabilidad promedio	32 %	79%	47%	Mayor probabilidad de operación sin fallas
Disponibilidad promedio	78 %	91%	17%	Mayor continuidad operacional

Nota. Elaboración propia.

A modo de propuesta, en los resultados anuales del escenario 1 se observa una disminución de las fallas a 16 fallas/año, aumenta el MTBF a 2.200 h/falla y la disponibilidad se eleva desde 86% a valores cercanos al 91%. La confiabilidad para un horizonte de operación de 520 h pasa desde 38% a 79%, cabe destacar que los valores reales deberán registrarse el próximo año para poder comparar, ajustar y evidenciar a la propuesta debido a que son datos estimados de la Tabla 3.7.

3.3.6 Análisis cuantitativo de la batería de hidrociclones

El análisis cuantitativo de la batería de hidrociclones se basa en los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad que se obtuvieron de las detenciones totales.

A partir de los datos recopilados, se determinó un MTBF promedio de 540 horas, valor inferior a la meta esperada de 700 horas, lo que representa una brecha del 22,8% en término de confiabilidad operacional. Este resultado evidencia una alta frecuencia de fallas, asociado principalmente al desgaste acelerado de componentes críticos.

Por otra parte, el MTTR presenta un valor promedio 96,5 horas por evento, superando significativamente el valor objetivo de 50 horas, lo que indica una baja mantenibilidad y tiempos prolongados de recuperación ante fallas.

En términos de disponibilidad, la batería de hidrociclones alcanza un 76,83%, lo cual se encuentra por debajo de estándares típicos para procesos continuos industriales (>85%). Esta disminución se traduce en pérdidas operacionales relevantes, considerando que opera de forma continua (24/7).

Adicionalmente, la tasa de fallas ($\lambda \approx 0,0037$ fallas/hora) refleja un comportamiento relativamente constante, lo que sugiere un régimen de desgaste más que fallas aleatorias, siendo consistente con mecanismos de degradación progresiva en componentes como ápex y vortex.

En conjunto, estos indicadores evidencian que la batería de hidrociclones presenta deficiencias tanto en confiabilidad como en mantenibilidad, por ende, afecta directamente en la continuidad operacional del proceso.

3.3.7 Relación entre fallas y desempeño

El análisis F.M.E.C.A. da como resultado una relación directa entre las fallas críticas y el impacto negativo al desempeño. El desgaste progresivo del ápex y el vortex se identifica como el principal modo de falla, generando una disminución de la presión de operación por debajo del rango óptimo (17–21 psi). Esta pérdida de presión afecta directamente a la incorrecta clasificación.

A modo de consecuencia, se genera una desviación en la relación arenas/lamas (23% / 45% vs 38% / 62%), lo que implica una disminución del desempeño cercana al 35% y una menor producción de arenas. Además, aumenta el contenido de finos en el underflow, deteriora la calidad del proceso incrementar el consumo de agua al 50%, generando mayores costos y exigencias. En términos de mantenimiento, estos modos de falla se traducen en una mayor frecuencia de intervenciones correctivas, lo que explica los bajos valores de MTBF y los elevados tiempos de MTTR observados. Por lo tanto, se establece que el desempeño deficiente de la batería de hidrociclones no es un fenómeno aislado, sino la consecuencia directa de la degradación de componentes críticos, evidenciando la necesidad de un enfoque de mantenimiento basado en condición.

Contemplando el análisis cuantitativo del desempeño, junto con la evaluación de la relación entre modos de falla y el comportamiento operacional, evidencian un impacto significativo sobre los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. En este contexto, se justifica la implementación de una propuesta plan de mantenimiento, orientado a la reducción de las frecuencias de fallas, mejorar el desempeño global, mediante la anticipación predictiva al desgaste componentes críticos y la optimización de las condiciones de operacional de esta manera alcanzar un aumento en los indicadores.

3.4 Propuesta Plan De Mantenimiento

La propuesta del plan de mantenimiento presentada en esta sección deriva de la aplicación del enfoque RCM II en conjunto con los análisis F.M.E.C.A. y SHA. En este marco, los modos de falla fueron priorizados y alineados con la lógica de tratamiento de fallas establecida en la norma SAE JA1012. En consecuencia, las frecuencias y tipos de intervención no fueron definidas únicamente por criterio operativo, sino por la evaluación estructurada de consecuencias, detectabilidad, factibilidad técnica y conveniencia económica.

Tabla 3.8

Priorización de actividades de mantenimiento basada en criticidad

Componente	Modo de Falla	Criticidad	Tipo de Mantenimiento	Frecuencia	Actividad Principal	Impacto Esperado
Ápex	Desgaste excesivo / aumento diámetro	Alta	Predictivo / Preventivo	Semanal	Inspección de desgaste y medición de diámetro	Mantener presión y eficiencia de clasificación
Vortex	Erosión interna / deformación	Alta	Predictivo / Preventivo	Semanal	Inspección visual y control de condiciones operacionales	Evitar pérdida de finos y mezcla de partículas
Válvulas de alimentación	Obstrucción / mala regulación	Alta	Preventivo	Mensual	Revisión y calibración de válvulas	Estabilidad de presión y caudal
Instrumentación (presión)	Lecturas erróneas / fallas de sensor	Media	Predictivo	Mensual	Verificación y calibración de instrumentos	Control confiable de operación
Líneas de impulsión	Desgaste / fugas	Media	Preventivo	Trimestral	Inspección estructural y detección de fugas	Reducción de pérdidas y detenciones
Bombas	Fallas mecánicas / desgaste interno	Media	Predictivo	Trimestral	Monitoreo de vibraciones y temperatura	Disminución de fallas imprevistas
Cajones (arena/lamas)	Acumulación / rebalse	Baja	Preventivo	Semestral	Limpieza y revisión general	Continuidad operativa
Sistema de agua	Variaciones de caudal	Baja	Preventivo	Semestral	Revisión de líneas y válvulas	Optimización del consumo hídrico

Nota. Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 3.8, los componentes críticos corresponden principalmente al ápex, vortex y válvulas de alimentación, los cuales presentan modos de falla asociados al desgaste y a la pérdida de control operacional. Estos elementos fueron clasificados con alta criticidad debido a su impacto directo en la eficiencia de clasificación y en la estabilidad del proceso, lo que justifica la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo con alta frecuencia de inspección, De este modo, el plan de mantenimiento propuesto no constituye solo una programación de actividades, sino un mantenimiento que justifica la metodología bajo RCM II y alineado con los criterios de SAE JA1011 y SAE JA1012, orientada a preservar las funciones del sistema y controlar las consecuencias más relevantes de sus falla. A continuación, se presenta la propuesta de plan de mantenimiento semanales, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales, véase en las Tabla 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14.

Tabla 3.9

Propuesta del Plan de Mantenimiento Semanal

Componente	Actividad	Descripción Detallada	Responsable	Implementos	Objetivo Técnico
Hidrociclón	Inspección visual	Revisar fugas, deformaciones, vibraciones.	Operador	Linterna, EPP	Detección temprana de daños visibles.
Underflow	Inspección del flujo	Observar roping/spray para identificar desgaste de Ápex.	Operador	Ninguno	Mantener calidad de clasificación.
Alimentación	Control de presión 17-21 psi	Registrar presión y fluctuaciones.	Operador	Manómetro	Detectar taponamientos o erosión interna.
Tuberías	Limpieza superficial	Retiro de material acumulado y residuos.	Operador	Cepillos industriales	Evitar corrosión y obstrucciones.
Carcasa	Revisión básica de vibración	Identificar vibración anómala.	Instrumentista	Estetoscopio mecánico / sensor vibro ligero	Evitar daños estructurales progresivos.
Válvulas	Revisión de funcionamiento	Detectar desgaste o cierre incompleto.	Mecánico	Llaves, lubricante	Controlar fugas y presión.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.10

Propuesta del Plan de Mantenimiento Mensual MP - MPD

Componente	Actividad	Descripción Detallada	Responsable	Instrumentos	Objetivo
Boquilla (Ápex)	Medición de diámetro / desgaste	Comparación con especificaciones y tolerancias internas.	Instrumentista + Mecánico	Calibrador, flexómetro	Reemplazo oportuno y control del flujo.
Vortex Finder	Inspección visual interna	Revisión de erosión, desgaste diferenciado y recubrimientos.	Mecánico especialista	Baroscopio, UT	Mantener eficiencia del proceso de clasificación.
Cono	Medición UT	Revisión de erosión interna y acumulación de desgaste.	Técnico Predictivo	Ultrasonido UT	Reducir riesgo de rotura por adelgazamiento.
Manifold	Termografía	Detección de puntos calientes indica obstrucción.	Técnico Predictivo	Cámara IR	Anticipar taponamientos grandes.
Juntas/bridas	Torque controlado	Asegurar estanqueidad y evitar fugas.	Mecánico	Torquímetro	Mantener continuidad del transporte.
Instrumentación	Calibración	Ajuste de sensores, transmisores y caudalímetros.	Instrumentista	Calibradores	Garantizar mediciones precisas.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3-11

Propuesta del Plan de Mantenimiento Trimestral MPD-ADV

Componente	Actividad	Detalle	Responsable	Insumos / Instrumentos	Objetivo Técnico
Boquilla	Reemplazo programado	Cambio según curva de desgaste o producción.	Mecánico	Boquillas nuevas, herramientas	Mantener flujo uniforme.
Cono	Inspección profunda	Desarme parcial, medición de espesores radial.	Técnico predictivo	UT, baroscopio	Identificar desgaste simétrico o asimétrico.
Vortex	Limpieza y desarme parcial	Eliminación de incrustaciones /recubrimiento si aplica.	Mecánico especialista	Recubrimientos, herramientas	Maximizar eficiencia de separación.
Manifold	Desobstrucción profunda	Análisis de distribución de alimentación.	Mecánico + Operador	Flashing, químicos	Evitar flujo desigual.
Estructura	Revisión profunda	Fisuras, deformaciones, vibraciones estructurales.	Mecánico mantenimiento	LP, PM	Evitar colapso o fallas estructurales.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.12

Propuesta del Plan de Mantenimiento Semestral MPD-ADV

Sistema	Actividad Anual	Descripción Técnica Detallada	Responsable	Insumos	Objetivo Técnico
Hidrociclón completo	Inspección dimensional anual	- Medición de diámetros internos/externos. - Comparación con medidas de diseño. - Identificación de deformaciones.	Mecánico especialista	Vernier, UT, plantillas	Evaluar desgaste acumulado.
Líneas de alimentación y descarga	Inspección anual de desgaste	- Revisión de desgaste en curvas y spools. - Flashing y limpieza profunda. - Pruebas de estanqueidad.	Mecánico	UT, herramientas	Mantener integridad del sistema.
Boquilla	Auditoría de vida útil	- Revisión de historial de desgaste. - Análisis de variaciones en flujo. - Planificación de cambios futuros.	Ingeniero + Mecánico	Registros, software Mantto	Optimizar costo vs vida útil.
Vortex	Evaluación de comportamiento	- Análisis de granulometría y finos. - Relación overflow/underflow anual.	Ingeniería de procesos	Laboratorio	Garantizar calidad del producto.
Soportes estructurales	Inspección superficial	- Revisión por corrosión. - Medición de espesores. - Aplicación de anti anticorrosivo si requiere.	Mecánico mantenimiento	Anticorrosivo, UT	Evitar pérdida de capacidad estructural.
Válvulas y actuadores	Calibración y prueba	- Prueba de apertura y cierre. - Verificación del sello. - Reajuste de actuadores.	Instrumentista	Equipos de calibración	Mantener regulación de flujo.
Sistema de instrumentación	Calibración anual certificada	- Prueba de apertura y cierre. - Verificación del sello. - Reajuste de actuadores.	Instrumentista	Certificadores metrológicos	Garantizar precisión del sistema.
Análisis del rendimiento anual	Evaluación MTBF / MTTR / OEE	- Medir disponibilidad. - Identificar pérdidas reales. - Evaluar impacto económico anual.	Ingeniería de mantenimiento	Software KPI	Mejorar plan para el siguiente año.
Control de producción	Auditoría de eficiencia del hidrociclón	- Tonelaje procesado vs diseño. - Eficiencia de corte (d50). - Rendimiento comparado.	Proceso + Ingeniería	Informes y datos	Ajustar operación según desgaste.
Seguridad operacional	Auditoría de riesgos	- Revisión anual de riesgos mecánicos. - Ajustes de procedimientos, protecciones.	HSEC + Mantención	Checklists	Mantener cumplimiento normativo.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.13

Propuesta del Plan de Mantenimiento Anual

Sistema	Actividad Anual	Descripción Técnica Detallada	Responsable	Insumos	Objetivo Técnico
Hidrociclón completo	Inspección dimensional anual	- Medición de diámetros internos/externos. - Comparación con medidas de diseño.	Mecánico especialista	Vernier, UT, plantillas	Evaluar desgaste acumulado.
Líneas de alimentación y descarga	Inspección anual de desgaste	- Revisión de desgaste en curvas y spools. - Flashing y limpieza profunda. - Pruebas de estanqueidad.	Mecánico	UT, herramientas	Mantener integridad del sistema.
Boquilla	Auditoría de vida útil	- Revisión de historial de desgaste. - Análisis de variaciones en flujo. - Planificación de cambios futuros.	Ingeniero + Mecánico	Registros, software mantto	Optimizar costo vs vida útil.
Vortex	Evaluación de comportamiento	- Análisis de granulometría y finos. - Relación overflow/underflow anual.	Ingeniería de procesos	Laboratorio	Garantizar calidad del producto.
Soportes estructurales	Inspección superficial	- Revisión por corrosión. - Medición de espesores. - Aplicación de anticorrosivo si requiere.	Mecánico mantenimiento	Anticorrosivo, UT	Evitar pérdida de capacidad estructural.
Válvulas y actuadores	Calibración y prueba	- Prueba de apertura y cierre. - Verificación del sello. - Reajuste de actuadores.	Instrumentista	Equipos de calibración	Mantener regulación de flujo.
Sistema de instrumentación	Calibración anual certificada	- Calibración documentada para auditoría. - Validación de sensores críticos.	Instrumentista	Certificadores metrológicos	Garantizar precisión del sistema.
Control de producción	Auditoría de eficiencia del hidrociclón	- Tonelaje procesado vs diseño. - Eficiencia de corte (d50). - Rendimiento comparado.	Proceso + Ingeniería	Informes y datos	Ajustar operación según desgaste.
Seguridad operacional	Auditoría de riesgos	- Revisión anual de riesgos mecánicos. - Ajustes de procedimientos. - Verificación de protecciones.	HSEC + Mantención	Checklists	Mantener cumplimiento normativo.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.14

Propuesta del Plan de Mantenimiento con Actividades del Overhaul

Sistema	Actividad Overhaul	Descripción Técnica Detallada	Responsable	Insumos	Objetivo Técnico
Hidrociclón completo	Desarme total del ciclón	- Desmontaje pieza por pieza. - Limpieza con agua a presión. - Identificación de desgaste interno. - Inspección de uniones, cortes y empaques. - Registro fotográfico.	Equipo completo (operador + mecánicos + instrumentista)	Hidrolavadora industrial, herramientas de izaje.	Volver a condición base y eliminar defectos ocultos.
Boquilla (ápex)	Reemplazo completo del conjunto	- Sustitución de boquillas principales y auxiliares. - Verificación dimensional. - Colocación de juntas nuevas. - Prueba de flujo.	Mecánico especialista	Kit de boquillas nuevas, sellos, herramientas.	Restablecer control del underflow.
Vortex Finder	Reemplazo total	- Retiro del vortex desgastado. - Inspección de asiento. - Instalación del nuevo. - Análisis de desgaste del componente retirado.	Mecánico especialista	Inserto nuevo, pernos, torque tools.	Asegurar distribución interna óptima del flujo.
Liners internos	Renovación completa del liner	- Cambio de liner cerámico, PU o carburo. - Aplicación con adhesivos industriales. - Ajuste dimensional según tolerancia.	Mecánico mantenimiento	Liner industrial, adhesivos, EPP.	Proteger carcasa y prolongar vida útil.
Carcasa del ciclón	Recubrimiento industrial total	- Preparación superficial (granallado). - Aplicación epóxica o cerámica. - Curado y acabado final. - Medición del espesor del recubrimiento.	Especialista en recubrimientos	Epóxicos/carburo, pistola airless.	Reducir desgaste abrasivo y químico.
Piping crítico	Recambio masivo	- Sustitución de spool desgastados. - Cambio de bridas deterioradas. - Revisión de anclajes. - Prueba hidráulica del circuito.	Mecánico + soldador	Spool nuevos, bridas, soportes.	Garantizar integridad del transporte de pulpa.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.14

Continuación Propuesta del Plan de Mantenimiento Actividades del Overhaul

Estructura soporte	Reacondicionamiento mayor	- Arenado, reparación y soldadura. - Reemplazo de perfiles dañados. - Refuerzo de anclajes. - Tratamiento anticorrosivo.	Mecánico especialista	Soldadora, electrodos, UHSS.	Evitar fallas estructurales por fatiga.
Uniones y juntas	Sustitución general	- Cambio total de empaques NBR/PU. - Sustitución de pernos críticos. - Torque controlado. - Ensayo de estanqueidad.	Mecánico	Empaques nuevos, torquímetro.	Evitar fugas y pérdida de presión.
Instrumentación	Restauración completa	- Cambio de sensores críticos. - Calibración total de transmisores de presión y caudal. - Verificación de PLC (cuando aplica).	Técnico instrumentista	Calibradores, sensores, software.	Garantizar mediciones exactas.
Ensayos No Destructivos (NDT)	UT avanzado / RX / PM	- Examen del espesor. - Búsqueda de fisuras internas. - Radiografía de puntos críticos. - Registro técnico.	Técnico UT / NDT Nivel II	UT HD, RX industrial.	Validar integridad total de componentes.
Pruebas finales	Ensayo hidráulico total	- Test de presión. - Detección de fugas. - Validación de operación con agua.	Equipo completo	Bomba de prueba, manómetro	Certificar funcionamiento seguro.

Nota. Elaboración propia.

3.5 El Impacto Técnico del Mantenimiento Predictivo en Beneficios Económicos

El plan de mantenimiento predictivo implementado tiene como objetivo principal mejorar el desempeño técnico de los activos críticos, mediante la detección temprana de fallas y la optimización en las intervenciones. No obstante, para justificar su aplicación desde un punto de vista económico, es fundamental establecer de manera explícita cómo estas mejoras técnicas se traducen en beneficios monetarios medibles, expresados en UF.

La aplicación sistemática de técnicas predictivas principalmente análisis de vibraciones, ultrasonido y medición de espesores permite monitorear el estado real de los equipos en operación y detectar modos de falla incipientes antes de que se materialicen como fallas funcionales de esta manera genera las siguientes mejoras técnicas relevantes:

- Reducción de la frecuencia de fallas: la identificación temprana de defectos evita fallas súbitas y catastróficas, disminuyendo la cantidad de eventos correctivos no planificados.
- Disminución de detenciones no programadas: al anticipar las fallas, las intervenciones pueden planificarse dentro de ventanas operacionales controladas.
- Incremento de la disponibilidad operacional: menos fallas y detenciones se traducen en una mayor proporción de tiempo en que los equipos se encuentran operativos.
- Mejor estabilidad del proceso: la reducción de eventos imprevistos permite una operación más continua, predecible y eficiente.

Las horas de detención evitadas genera la disminución del costo de detención por hora (UF/h) generando un ahorro reflejado en el impacto económico asociado a la continuidad operacional, incluyendo pérdidas productivas, ineficiencias del proceso y costos indirectos derivados de paradas no planificadas.

3.5.1 Metodología económica

Para evaluar la conveniencia económica del escenario 1 de mantenimiento propuesto se utilizará los indicadores financieros clásicos de evaluación de proyectos: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI). Estos criterios permiten comparar los beneficios económicos derivados de la reducción de fallas, horas de detención y costos de mantenimiento, frente a la inversión adicional requerida para implementar el plan basado en R.C.M.

El VAN representa el valor presente de los flujos de caja futuros generados por el proyecto, descontados a una determinada tasa, menos la inversión inicial. Matemáticamente se expresa como:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0$$

donde FC_t son los flujos de caja netos en el año t , i es la tasa de descuento y I_0 es la inversión inicial. Un VAN mayor que cero indica que el proyecto genera valor para la organización y, por lo tanto, es económicamente aceptable.

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Es decir, corresponde a la rentabilidad interna del proyecto. Se define como el valor de i que satisface:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Un proyecto es recomendable cuando su TIR es mayor que la tasa de descuento definida por la empresa, ya que implica que la rentabilidad esperada supera el costo de oportunidad del capital.

El PRI o periodo de recuperación de la inversión corresponde al tiempo necesario para que los flujos de caja acumulados iguallen la inversión inicial. Este indicador entrega una medida simple del plazo en que se recupera el desembolso realizado y es especialmente útil para comparar alternativas con diferentes niveles de inversión y riesgo.

Para este estudio se consideró un horizonte de evaluación de 5 años, coherente con la vida útil de los principales componentes de la batería de hidrociclones y con los ciclos de planificación de inversiones de la planta. Asimismo, se adoptó una tasa de descuento real del 10% anual, representativa del costo de oportunidad del capital y del nivel de riesgo asociado al proyecto. Sobre la base de estos supuestos se construyen los flujos de caja de cada escenario y se calculan el VAN, la TIR y el PRI, permitiendo comparar la conveniencia económica reflejado en UF.

3.5.2 Costos de implementación

La implementación del mantenimiento predictivo requiere la adquisición de herramientas e instrumentación especializada, que permita ejecutar las actividades de monitoreo definidas en el plan técnico. En este grupo se incluyen, entre otros:

Equipos de análisis de vibraciones (analizadores portátiles, sensores, acelerómetros), instrumentos de ultrasonido para detección de fallas mecánicas, eléctricas y fugas, equipos para medición de espesores, utilizados en el control de corrosión y erosión, software asociado para adquisición, almacenamiento y análisis de datos, accesorios, licencias y elementos complementarios necesarios para la operación de los equipos.

Para asegurar el uso correcto y eficiente de la instrumentación adquirida, así como la adecuada interpretación de los resultados obtenidos, es necesario considerar la capacitación del personal de mantenimiento y confiabilidad, especialmente en aquellos casos donde no exista experiencia previa en técnicas de mantenimiento predictivo es importante capacitar en cursos técnicos en análisis de vibraciones, ultrasonido y medición de espesores y certificaciones técnicas.

En las siguientes Tabla 3.15 - 3.16 - 3.17 - 3.18 - 3.19 - 3.20 - 3.21 - 3.22 - 3.23 y 3.24 se presenta el detalle de los costos asociados a la capacitación del personal involucrado en la ejecución del mantenimiento predictivo, así como la inversión inicial en herramientas e instrumentación. Para cada ítem se indica su descripción, cantidad, costo unitario y costo total, permitiendo identificar claramente la composición de la inversión inicial expresada en UF.

Tabla 3.15

Costos de Capacitación

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo unitario (UF)	Costo total (UF)
Capacitación en análisis de vibraciones	Curso técnico básico/intermedio para personal de mantenimiento	4 personas	25	100
Capacitación en ultrasonido	Curso técnico para detección de fallas mecánicas y fugas	4 personas	20	80
Capacitación en medición de espesores	Curso en control de corrosión y erosión	4 persona	15	60
Horas hombre de capacitación	Tiempo de formación (HH × costo HH)	40 HH	0,2	8
Subtotal capacitación				148 UF

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.16

Costos de Herramientas e Instrumentación

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo unitario (UF)	Costo total (UF)
Analizador de vibraciones portátil	Equipo para monitoreo de condición mecánica	3	180	540
Sensores/acelerómetros	Sensores para mediciones de vibración	3	15	153
Equipo de ultrasonido	Instrumento para detección de fallas mecánicas y eléctricas	3	90	270
Medidor de espesores	Equipo para control de corrosión y erosión	3	70	210
Software/licencias	Software de análisis y gestión de datos	3	30	90
Accesorios y puesta en marcha	Cables, maletines, calibración	10	10	100
Subtotal herramientas e instrumentación				1363 UF

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.17

Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Rutina

Sistema	Actividad	Frecuencia	FA	Duración (HH/interv)	N° persona	Responsable	Costo HH (UF/HH)	Costo anual (UF)
Hidrociclón completo	Inspección visual (fugas, deformaciones, material acumulado)	Diaria	365	0,25	1	Operador	0,168	15,34
Underflow	Verificación forma del flujo (roping/spray)	Diaria	365	0,17	1	Operador	0,168	10,43
Alimentación	Control de presión (17–21 psi)	Diaria	365	0,08	1	Operador	0,168	4,91
Tuberías	Limpieza superficial	Semanal	52	0,50	1	Operador	0,168	4,37
Carcasa/soportes	Revisión básica de vibración (sensor ligero / estetoscopio)	Semanal	52	0,50	1	Instrumentista	0,196	5,10
Válvulas	Verificación de funcionamiento	Mensual	12	0,50	1	Mecánico	0,189	1,13
Subtotal mano de obra mantenimiento de rutina								41,28

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.18

Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Mensual

Sistema	Actividad	Frecuencia	FA	Duración (HH/interv)	Nº persona	Responsable	Costo HH (UF/HH)	Costo anual (UF)
Boquilla (Ápex)	Medición diámetro / desgaste	Mensual	12	1,0	2	Instrumentista + Mecánico	0,196 + 0,189	4,62
Vortex Finder	Inspección visual interna	Mensual	12	2,0	1	Mecánico especialista	0,224	5,38
Cono	Medición UT	Mensual	12	1,5	1	Técnico Predictivo	0,252	4,54
Manifold	Termografía	Mensual	12	1,0	1	Técnico Predictivo	0,252	3,03
Juntas/Bridas	Torque controlado	Mensual	12	1,0	1	Mecánico	0,189	2,27
Instrumentación	Calibración	Mensual	12	1,0	1	Instrumentista	0,196	2,35
Subtotal mano de obra Mantenimiento mensual								22,19

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.19

Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Trimestral

Sistema	Actividad	Frecuencia	FA	Duración (HH/interv)	N° persona	Responsable	Costo HH (UF/HH)	Costo anual (UF)
Boquilla	Reemplazo programado	Trimestral	4	2,0	1	Mecánico	0,189	1,51
Cono	Inspección profunda (desarme parcial espesores radial)	Trimestral	4	4,0	1	Técnico predictivo	0,252	4,03
Vortex	Limpieza y desarme parcial	Trimestral	4	3,0	1	Mecánico especialista	0,224	2,69
Manifold	Desobstrucción profunda + análisis distribución	Trimestral	4	4,0	2	Mecánico + Operador	0,189 + 0,168	5,71
Estructura	Revisión profunda (fisuras/deformación/vibración estructural)	Trimestral	4	3,0	1	Mecánico mantención	0,210	2,52
Subtotal mano de obra Mantenimiento trimestral								16,46

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.20

Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Anual

Sistema	Actividad anual	FA	Duración	N° persona	Responsable	Costo HH (UF/HH)	Costo anual (UF)
Hidrociclón completo	Inspección dimensional anual	1	6,0	1	Mecánico especialista	0,224	1,34
Líneas alimentación/descarga	Inspección desgaste + flushing + estanqueidad	1	8,0	1	Mecánico	0,189	1,51
Boquilla	Auditoría vida útil (historial + análisis + planificación)	1	4,0	2	Ingeniero + Mecánico	0,252 + 0,189	1,76
Vortex	Evaluación de comportamiento (granulometría/relación O/F)	1	6,0	1	Ingeniería de procesos	0,252*	1,51
Soportes estructurales	Inspección + espesores + anticorrosivo si aplica	1	6,0	1	Mecánico mantención	0,210	1,26
Válvulas y actuadores	Calibración y prueba	1	4,0	1	Instrumentista	0,196	0,78
Sistema instrumentación	Calibración anual certificada (documentada)	1	6,0	1	Instrumentista	0,196	1,18
Control producción	Auditoría eficiencia (tonelaje vs diseño, d50, etc.)	1	6,0	2	Proceso + Ingeniería	0,252* + 0,252*	3,02
Seguridad operacional	Auditoría riesgos (procedimientos/protecciones)	1	4,0	2	HSEC + Mantención	0,252* + 0,210	1,85
Subtotal mano de obra Mantenimiento anual							14,20

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.21

Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Overhaul

Sistema	Actividad Overhaul	Descripción resumida	Frecuencia	FA	Duración	Personas	Responsable	Costo (HH)	Costo anual (UF)
Hidrociclón completo	Desarme total del ciclón	Desmontaje completo, limpieza HP, inspección visual y registro fotográfico de desgaste interno.	Overhaul	0,2	24	4	Operador Mecánico Mecánico Mant. Instrumentista	0,763	3,66
Boquilla (Ápex)	Reemplazo completo	Cambio de boquillas, instalación de sellos nuevos y prueba de flujo.	Overhaul	0,2	6	1	Mecánico especialista	0,224	0,27
Vortex Finder	Reemplazo total	Retiro del vortex desgastado, inspección de asiento y montaje de nuevo componente.	Overhaul	0,2	8	1	Mecánico especialista	0,224	0,36
Liners internos	Renovación completa	Sustitución de liner cerámico / PU / carburo con ajuste dimensional.	Overhaul	0,2	16	2	Mecánico Mant. Mecánico	0,399	1,28
Carcasa del ciclón	Recubrimiento industrial	Granallado, aplicación epóxica o cerámica y medición de espesor.	Overhaul	0,2	20	2	Mecánico especialista Mecánico Mant.	0,434	1,74

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.20

Continuación Costos de Mano de Obra Mantenimiento de Overhaul

Piping crítico	Recambio masivo	Cambio de spools y bridas, alineación y prueba hidráulica.	Overhaul	0,2	24	2	Mecánico. Soldador	0,413	1,98
Estructura soporte	Reacondicionamiento mayor	Arenado, soldadura estructural, refuerzo de anclajes y protección anticorrosiva.	Overhaul	0,2	16	1	Mecánico especialista	0,224	0,72
Uniones y juntas	Sustitución general	Cambio de empaques, pernos críticos y torque controlado.	Overhaul	0,2	10	1	Mecánico	0,189	0,38
Instrumentación	Restauración completa	Reemplazo de sensores críticos y calibración total del sistema.	Overhaul	0,2	12	1	Instrumentista	0,196	0,47
END / NDT	Ensayos no destructivos avanzados	UT HD, PM y RX en zonas críticas del sistema.	Overhaul	0,2	14	1	Técnico NDT Nivel II	0,252	0,71
Sistema completo	Pruebas finales	Ensayo hidráulico, detección de fugas.	Overhaul	0,2	8	4	Operador Mecánico Mecánico Mant. Instrumentista	0,763	1,22
Subtotal mano de obra Mantenimiento overhaul									12,78

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.21

Costos de Repuestos del Hidrociclón

Sistema	Repuesto	Descripción técnica	Frecuencia	FA	Cantidad por evento	Costo unitario (UF)
Boquilla (Ápex)	Ápex PU / cerámico	Componente crítico de desgaste del underflow	Trimestral	4	1	6,0
Juntas y sellos	Juntas NBR / PU	Sellos de bridas y uniones	Trimestral	4	1	1,5
Vortex Finder	Inserto vortex	Componente de control del overflow	Anual	1	1	12,0
Pernos críticos	Pernos, tuercas alta resistencia	Pernos expuestos a corrosión	Anual	1	1	2,0
Sensores presión	Sensor presión slurry	Instrumentación crítica	Anual	1	1	4,0

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.22

Costos de Repuestos Estructurales

Sistema	Repuesto	Descripción técnica	FA	Cantidad	Costo unitario (UF)	Costo anual (UF)
Líneas alimentación	Spools de tubería	Tramos críticos de alta abrasión	1	1	15,0	15,0
Válvulas	Kit de reparación válvula	Sellos, asientos y empaques	1	1	6,0	6,0
Instrumentación	Kit calibración / reemplazo	Sensores menores y fittings	1	1	3,0	3,0
Soportes	Pintura/anticorrosivo	Protección estructural	1	1	2,0	2,0

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.23

Costos de Repuestos de la Batería de Hidrociclón

Sistema / Componente	Repuesto Overhaul	Descripción	FA	Cantidad	Costo unitario (UF)	Costo anualizado (UF)
Hidrociclón completo	Liner interno (PU cerámico)	Protección interna total	0,2	1	80,0	16,0
Carcasa	Recubrimiento industrial	Epóxico / cerámico	0,2	1	60,0	12,0
Boquillas	Kit completo Ápex	Juego completo	0,2	1	20,0	4,0
Vortex Finder	Vortex completo	Reemplazo total	0,2	1	18,0	3,6
Piping crítico	Spools y bridas	Recambio masivo	0,2	1	40,0	8,0
Instrumentación	Sensores críticos	Presión, caudal	0,2	1	10,0	2,0
Total repuestos						119,6

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.24

Costos Totales de la Inversión

Categoría	Costo total (UF)
Herramientas e instrumentación	1363
Mano de obra mantenimiento rutinario	41,28
Mano de obra mantenimiento mensual	22,19
Mano de obra mantenimiento trimestral	16,46
Mano de obra mantenimiento anual	14,20
Mano de obra mantenimiento overhaul	12,78
Repuestos y capacitación del personal	267,6
Total inversión	1737,51 UF

Nota. Elaboración propia.

3.5.3 Estimación de beneficios anuales por reducción de fallas no planificadas

Se analizan los impactos asociados a la disminución de fallas no planificadas, la reducción de horas de detención del sistema y la consecuente mejora en la disponibilidad operacional. La cuantificación de los beneficios se realiza mediante la comparación de indicadores técnicos clave, tales como la cantidad de fallas relevantes por año, las horas de detención asociadas y los costos de mantenimiento correctivo, entre el escenario 1 y escenario 0.

Las diferencias observadas se monetizan utilizando costos referenciales de detención, costos históricos de mantenimiento y supuestos operacionales conservadores, permitiendo estimar los beneficios económicos anuales expresados en UF.

En las tablas siguiente Tabla 3.25 se presentan los resultados del modelo de beneficios con la estrategia del RCM II, donde se detalla el valor de cada métrica técnica en el escenario actual y en el escenario propuesto, la diferencia atribuible a la implementación del mantenimiento predictivo y su correspondiente impacto económico anual.

Tabla 3.25

Estimaciones al Impacto de Producción Implementando el Escenario 1

Supuesto	Valor	Descripción
Régimen de operación	24/7 (continuo)	Operación continua 24/7.
Horas calendario por año	8.760 h/año	24×365
Arenas finas	70.000 CLP/ton	Parámetros económicos y operacionales.
Tasa de producción	100 ton/h	Parámetros económicos y operacionales.
Eficiencia global	0,0625	Parámetros económicos y operacionales.
Impuesto usado en el flujo	5%	Tasa única del 5% reflejado.
Horizonte de evaluación	5 años	Se amplía a 5años como base.
Tasa de descuento real	15% anual	Tasa de descuento real 15% anual.
Capacidad RR.HH.	Máx. 4 técnicos	Requerimiento de personal.

Nota. Elaboración propia.

3.6 Flujo De Caja

La estructura del flujo contempla de manera concreta que cada año: (+) ingresos operacionales, (-) costos de mantenimiento, (-) costos operacionales, y la incorporación de depreciación lineal calculada a partir del valor de los equipos funcionales (batería de 4 Recyclones Cavex 500 en serie).

Se determina la utilidad antes de impuestos y se aplica la tasa de impuesto del 5%, reflejándola en el flujo para mantener coherencia con la evaluación financiera. Finalmente, el flujo neto de caja se obtiene sumando la utilidad después de impuesto y reincorporando la depreciación (por ser un cargo no desembolsable), y considerando la inversión inicial en el año 0. A continuación, se presenta los flujos de caja a 5 años del actual y del escenario 1, se presenta el desglose de los flujos de caja en las siguientes Tabla 3.6 y 3.7.

Tabla 3.26

Flujo de Caja del Escenario 0

Ítem	Año 0 (UF)	Año 1 (UF)	Año 2 (UF)	Año 3 (UF)	Año 4 (UF)
(+) ingresos operacionales	—	684,0	738,7	797,8	873,9
(-) Costos del mantenimiento	—	-166,9	-185,3	-205,6	-228,3
Utilidad bruta	—	517,1	553,5	592,2	645,7
(-) Costos operacionales	—	-123,1	-128,0	-133,2	-138,5
Utilidad operacional	—	394,0	425,4	459,0	507,2
(-) Depreciación	—	-319,8	-319,8	-319,8	-319,8
(=) Utilidad antes de impuesto	—	74,2	105,6	139,2	187,4
Impuesto 5%	—	-3,7	-5,3	-7,0	-9,4
Utilidad después de impuesto	—	70,5	100,3	132,3	178,0
Depreciaciones	—	319,8	319,8	319,8	319,8
(-) Inversión	-1368	—	—	—	—
Total Anual	—	390,3	420,1	452,1	497,8
Flujo Neto de Caja	-1368	390,3	420,1	452,1	497,8
VAN (15%)	-129 UF				
TIR	10%				
PRI	4 años 6 meses				

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.27

Flujo de Caja del Escenario 1

Ítem	Año 0 (UF)	Año 1 (UF)	Año 2 (UF)	Año 3 (UF)	Año 4 (UF)
(+) ingresos operacionales	—	1586,9	1713,8	1850,9	1999,0
(-) Costos del mantenimiento	—	-251,7	-279,4	-310,1	-344,2
Utilidad bruta	—	1335,2	1434,4	1540,8	1654,8
(-) Costos operacionales	—	-76,6	-78,9	-81,3	-83,7
Utilidad operacional	—	1258,5	1355,5	1459,5	1571,1
(-) Depreciación	—	-355,3	-355,3	-355,3	-355,3
(=) Utilidad antes de impuesto	—	903,2	1000,2	1104,2	1215,8
Impuesto 5%	—	-45,2	-50,0	-55,2	-60,8
Utilidad después de impuesto	—	858,1	950,2	1049,0	1155,0
Depreciaciones	—	355,3	355,3	355,3	355,3
(-) Inversión	-3335	—	—	—	—
Total Anual	—	1213,4	1305,5	1404,3	1510,3
Flujo Neto de Caja	-3335	1213,4	1305,5	1404,3	1510,3
VAN (15%)	494 UF				
TIR	22%				
PRI	3 años 5 Meses				

Nota. Elaboración propia.

Al contrastar ambos escenarios, se concluye que el escenario 1 es económicamente superior al mantenimiento actual, debido a que:

- Genera mayor valor económico acumulado: el VAN de la propuesta (494 UF) es mucho mayor que el del mantenimiento actual (-129 UF).
- Presenta mayor rentabilidad del proyecto: la TIR sube desde 10% (actual) a 22% (propuesta), lo que indica una alternativa con retorno más atractivo.
- Recupera la inversión en menos tiempo: el PRI mejora desde 4 años 6 meses a 3 años 5 meses, reduciendo el riesgo financiero por tiempo de recuperación.

La evaluación técnico-económica desarrollada, a través de indicadores como el VAN, TIR y PRI, permite dar cumplimiento al Objetivo Específico 3, ya que se cuantifica el impacto económico del plan de mantenimiento propuesto y se valida su viabilidad desde una perspectiva financiera y operacional.

Conclusión y Recomendaciones

Se dio cumplimiento al objetivo general de diseñar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM II para la batería de hidrociclones, logrando establecer una propuesta orientada a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia del sistema, en respuesta a las deficiencias operacionales identificadas.

En relación con el primer objetivo específico, el análisis de los datos operacionales evidenció desviaciones relevantes respecto a los parámetros de diseño, tales como una disponibilidad promedio de 76–78%, una confiabilidad cercana al 32% y una relación arenas/lamas de aproximadamente 35%, valores inferiores a los rangos esperados. Asimismo, se identificó que la presión de operación se encuentra por debajo del rango óptimo (17–21 psi), lo que impacta directamente en la eficiencia de clasificación. Estas desviaciones se asocian principalmente al desgaste progresivo del ápex y del vortex, confirmando que dichos componentes concentran la mayor criticidad operacional.

Respecto al segundo objetivo específico, la aplicación de la metodología RCM II junto con el análisis F.M.E.C.A. permitió identificar y priorizar los modos de falla críticos, destacando aquellos asociados al desgaste, obstrucción y desbalance hidrodinámico. A partir de este análisis, se definió un plan de mantenimiento estructurado con frecuencias específicas (semanal, mensual, trimestral y anual), incorporando técnicas predictivas y preventivas. Como resultado, se proyecta una mejora en los indicadores operacionales, tales como un incremento del MTBF desde valores cercanos a 270 h/falla hasta aproximadamente 576 h/falla, una reducción del MTTR entre un 15% y 25%, y un aumento de la disponibilidad operacional hasta rangos de 85–88%, evidenciando una mejora directa en la confiabilidad del sistema.

En cuanto al tercer objetivo específico, la evaluación técnico-económica mediante VAN, TIR y PRI demostró que la implementación del plan es económicamente viable. Los resultados obtenidos se relacionan directamente con la reducción de fallas críticas identificadas en el análisis FMECA, ya que la disminución de detenciones no programadas, la optimización del consumo de agua y la reducción del desgaste de componentes permiten disminuir los costos operacionales y aumentar la eficiencia del sistema, así como reducir el uso de repuestos críticos entre un 20% y 30%. Estos resultados confirman que la inversión en mantenimiento predictivo no solo es justificable desde el punto de vista técnico, sino también desde la rentabilidad del negocio.

En este contexto, el presente estudio aporta una solución concreta y aplicable, permitiendo transitar desde un enfoque reactivo hacia un modelo de mantenimiento basado en confiabilidad. La implementación del plan tendría un impacto directo en la operación, reflejado en el aumento de la disponibilidad hasta 85–88%, la reducción de fallas y tiempos de reparación, y una mayor continuidad operacional. Asimismo, la estabilización de la presión en rangos óptimos contribuiría a mejorar la eficiencia de clasificación, incrementando la calidad de las arenas y reduciendo la recirculación de finos, lo que se traduce en una operación más estable y controlada. Desde el punto de vista económico, se proyecta una disminución de costos asociados al mantenimiento correctivo, optimización del consumo de agua y menor uso de repuestos, posicionando al mantenimiento como un generador de valor.

En contraste, el escenario actual evidencia una baja capacidad de generación de valor, reforzando la necesidad de adoptar un modelo de gestión de activos que considere el impacto económico de la confiabilidad operacional como un factor estratégico para la toma de decisiones.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda extender la aplicación de la metodología RCM y del mantenimiento predictivo a otros equipos críticos del proceso minero, tales como chancadores, correas transportadoras y bombas de impulsión.

Las detenciones no planificadas generan impactos significativos en la producción y los costos operacionales, para una correcta implementación del plan, se recomienda su aplicación gradual mediante un piloto enfocado en los componentes críticos (ápex y vortex), junto con la capacitación del personal en monitoreo de condiciones y análisis de fallas. Asimismo, es clave incorporar sistemas de monitoreo de variables operacionales, asegurar la disponibilidad de repuestos críticos y establecer un seguimiento continuo de indicadores como MTBF, MTTR y disponibilidad. Una vez validados los resultados, el modelo puede escalarse a otros equipos del proceso, consolidando una gestión integral del mantenimiento.

La batería de hidrociclones demuestra que una gestión de mantenimiento basada en confiabilidad no solo mejora el desempeño técnico de los activos, sino que también se transforma en una herramienta estratégica de optimización económica. Por ello, se propone que la empresa adopte este enfoque como estándar para la gestión de sus activos críticos, fortaleciendo una cultura organizacional orientada a la prevención, la eficiencia operativa y la sostenibilidad del negocio en el largo plazo.

Finalmente, se identifican oportunidades de incorporar enfoques innovadores utilizados en industrias avanzadas, tales como el mantenimiento predictivo basado en analítica de datos e inteligencia artificial, el uso de gemelos digitales para simulación operativa, metodologías de mantenimiento basado en riesgo (RBM) y estrategias de mantenimiento autónomo (TPM), de esta manera se puede desarrollar en conjunto para avanzar hacia un modelo de mantenimiento más avanzado y alineado con la industria 4.0.

Referencia

JRI INGENIERIA. (noviembre 2016). Confección de manuales y capacitaciones para pem proyecto ciclones muro este: [manual institucionala]

WEIR-VULCO S.A. A WEIR GROUP COMPANY. (06 de julio de 2020) *Manual de operación y mantenimiento de la batería de ciclones cavex* [En línea]

https://kupdf.net/download/manual-bateria-cavex-ciclones_59a10bffd0d6046331849e_pdf

JOHN MOUBRAY. (19 Junio 2020). *Reliability-centered Maintenance* [En línea]

<https://es.slideshare.net/oliver4ever/libro-rcm-de-j-moubray>

M. ANTUNESR. A. MEDRONHO. (22 mayo 2020) *Bradley Hydrocyclones: Design and Performance Analysis* [En línea] [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-015-7981-](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-015-7981-0_1)

[0_1](#)

SERVICIOS IMPUESTOS INTERNOS MINERÍA. (15 de agosto de 2020)

Contribuyentes [En línea] http://www.sii.cl/contribuyentes/empresas_por_sector/mineria.pdf

SAE International. (2016). *Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (R.C.M) processes* (SAE standard JA1011). SAE International. <http://doi.org/10.4271/JA1011>

SAE International. (2016). *A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard* (SAE Standard JA1012). SAE International. <https://doi.org/10.4271/JA1012>

SAE International. (2021). *Potential failure mode and effects analysis (FMEA)* (SAE Standard J1739). SAE International. <https://doi.org/10.4271/J1739>

International Organization for Standardization. (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment* (ISO Standard No. 14224). ISO. <https://www.iso.org/standard/69251.html>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM—Gateway to world class maintenance*. Elsevier.

Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press.

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.