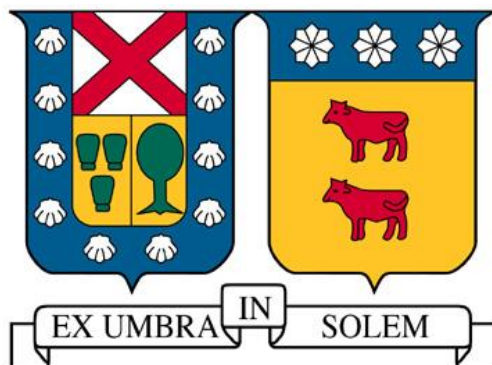


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



Evaluación técnico-económica de una política de mantenimiento basada en confiabilidad para equipos críticos del área de flotación.

FELIPE ANDRÉS RODRÍGUEZ QUIDEL

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA: SR. RAUL STEGMAIER.

SEPTIEMBRE 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: Evaluación técnico-económica de una política de mantenimiento basada en confiabilidad para equipos críticos del área de flotación

Nombre del candidato(a): Felipe Rodríguez Quidel

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura ; Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, 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

☒ 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:

☐ 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: 01/10/2026; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30/09/26; 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.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	3
3. OBJETIVOS.....	5
3.1 OBJETIVO GENERAL	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
4. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	6
4.1 LEVANTAMIENTO DEL PROCESO.....	6
4.2 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	8
4.3 RESULTADOS.....	9
5. MARCO TEÓRICO	10
5.1 INTRODUCCIÓN.	10
5.2 CONCEPTO DE MANTENIMIENTO.	10
5.3 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO.	10
5.4 TIPOS DE MANTENIMIENTO.	10
5.4.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO.	11
5.4.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO.	11
5.5 CONCEPTOS EN GESTIÓN DE MANTENIMIENTO.	11
5.5.1 TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS.....	11
5.5.2 TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN.....	12
5.5.3 DISPONIBILIDAD.	12
5.5.4 MODO DE FALLA.....	13
5.5.5 TASA DE FALLA.....	13
5.5.6 MANTENIBILIDAD.....	14
5.5.7 CONFIABILIDAD.	14
5.6 ANÁLISIS DE FALLA Y CRITICIDAD.....	20
5.6.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONFIABILIDAD.	20
5.6.2 ANÁLISIS DE PARETO.	20

5.6.3 ANÁLISIS JACK KNIFE.	21
5.7 ESTRUCTURA DE COSTOS.	23
5.7.1 COSTO GLOBAL DE MANTENIMIENTO.	23
5.8 POLÍTICA DE MANTENIMIENTO	24
5.8.1 MODELO MANTENCIÓN PREVENTIVA A EDAD CONSTANTE.	25
6. DESARROLLO DEL TEMA.....	26
6.1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES ÁREA DE FLOTACIÓN.....	26
6.2 CONDICIÓN DE MANTENIMIENTO DE EQUIPOS Y COMPONENTES.	26
6.3 ANÁLISIS DE FALLA Y CRITICIDAD DE EQUIPOS Y COMPONENTES.	28
6.3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONFIABILIDAD.	28
6.3.2 ANÁLISIS DE COSTO GLOBAL DE MANTENIMIENTO.....	29
6.3.3 ANÁLISIS DE PARETO A LOS MODOS DE FALLAS.	31
6.3.4 ANÁLISIS JACK KNIFE A LOS MODOS DE FALLAS CORRECTIVOS.	33
6.3.5 CRITERIO FINAL DE SELECCIÓN DE COMPONENTES CRÍTICOS.	36
6.3.6 MODELO DE CONFIABILIDAD A LOS MODOS DE FALLAS CRÍTICOS.	38
7. RESULTADOS	46
7.1. RESULTADOS DE CRITICIDAD	46
7.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD.	46
7.3. EVALUACIÓN DE LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN USO	47
7.3.1 MODELO MANTENCIÓN PREVENTIVA A EDAD CONSTANTE.	48
7.4. RESULTADO ECONÓMICO POLÍTICA DE MANTENIMIENTO PROPUESTA.	48
7.4.1 RESULTADO BOMBA CENTRÍFUGA	48
7.4.2 RESULTADO SISTEMA DE TRANSMISIÓN	49
7.4.3 RESULTADO DUCTO AGUA PROCESO.....	50
7.5 LINEAMIENTOS PARA UNA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO DIFERENCIADA	51
7.5.1 REGISTRO DE HORAS Y EVENTOS	52
7.5.2 INTERPRETACIÓN DE LAS EDADES ECONÓMICAS.....	52
7.5.3 SEGUIMIENTO DE CONDICIÓN Y PLANIFICACIÓN	53
7.5.4 REPUESTOS Y COORDINACIÓN OPERACIONAL	53

7.5.5 TRATAMIENTO DE NUEVOS EVENTOS	53
7.5.6 INDICADORES DE SEGUIMIENTO	54
7.5.7 REVISIÓN DE LOS PARÁMETROS	54
7.6 RESULTADO GENERAL DEL ESTUDIO.....	54
8. CONCLUSIONES.....	56
8.1 SÍNTESIS CUANTITATIVA DE LOS COMPONENTES MODELADOS MEDIANTE WEIBULL	56
8.2 SUPUESTOS Y LIMITACIONES ASOCIADOS A LOS RESULTADOS	57

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN N° 1 BASE DE DATOS OBTENIDAS DESDE EL ERP	7
IMAGEN N° 2 FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD WEIBULL PARA VARIOS VALORES DE B	15
IMAGEN N° 3 CONFIGURACIÓN EN SERIE DE EQUIPOS Y COMPONENTES DE LÍNEAS FUNCIONALES.	28

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 CURVA DE CONFIABILIDAD DE WEIBULL PARA DISTINTOS B.	19
GRÁFICO 2 CURVA DE TASA DE FALLA DE WEIBULL PARA DISTINTOS B.	20
GRÁFICO 3 DIAGRAMA DE PARETO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	21
GRÁFICO 4 GRÁFICO DE CRITICIDAD JACK KNIFE (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	22
GRÁFICO 5 DIAGRAMA DE PARETO MODOS DE FALLAS LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	32
GRÁFICO 6 GRÁFICA JACK KNIFE LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	35
GRÁFICO 7 CURVA CONFIABILIDAD EQUIPOS Y COMPONENTES LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	43
GRÁFICO 8 CURVA TASA DE FALLA EQUIPOS Y COMPONENTES LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	44
GRÁFICO 9 REGRESIÓN LINEAL BOMBA CENTRÍFUGA LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	63
GRÁFICO 10 REGRESIÓN LINEAL SISTEMA DE TRANSMISIÓN - LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	64
GRÁFICO 11 REGRESIÓN LINEAL DUCTO AGUA PROCESO - LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	64

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 NÚMERO DE FALLAS POR EQUIPO Y COMPONENTE	8
TABLA 2 EJEMPLO TABLA DE DATOS PARA MODELO WEIBULL – FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	16
TABLA 3 TABLA DE DATOS PARA TEST KOLMOGOROV-SMIRNOV – FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	17
TABLA 4 TABLA DE K-S.....	18
TABLA 5 MODO DE FALLA Y TIPO DE MANTENIMIENTO SEGÚN COMPONENTES.	27
TABLA 6 CUANTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLAS EN LÍNEA FUNCIONAL N°1 ETAPA 1	28
TABLA 7 COSTOS GLOBALES MANTENIMIENTO POR MODO DE FALLA LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	31
TABLA 8 PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LOS MODOS DE FALLA EN LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	32
TABLA 9 DATOS CONSTRUCTIVOS JACK KNIFE LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	34
TABLA 10 TABLA FINAL DE PRIORIZACIÓN DE MODOS DE FALLA PARA MODELAMIENTO DE CONFIABILIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	37
TABLA 11 PARÁMETROS DE WEIBULL LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	39
TABLA 12 TABLA DE DATOS K-S BOMBA CENTRÍFUGA – LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	40
TABLA 13 TABLA DE DATOS K-S SIST. DE TRANSMISIÓN – LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	40
TABLA 14 TABLA DE DATOS K-S DUCTO AGUA PROCESO– LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	41
TABLA 15 TABLA DE K-S.....	42
TABLA 16 RESULTADO ECONÓMICO POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BOMBA CENTRÍFUGA.	49
TABLA 17 RESULTADO ECONÓMICO POLÍTICA DE MANTENIMIENTO SISTEMA DE TRANSMISIÓN	50
TABLA 18 RESULTADO ECONÓMICO POLÍTICA DE MANTENIMIENTO DUCTO AGUA PROCESO	51
TABLA 19 CRITERIOS OPERACIONALES EQUIPOS ANALIZADOS.	52
TABLA 20 INDICADORES DE CONFIABILIDAD DE EQUIPOS ANALIZADOS	57
TABLA 21 TABLA DE REGRESIÓN LINEAL BOMBA CENTRÍFUGA LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	62
TABLA 22 TABLA DE REGRESIÓN LINEAL SIST. DE TRANSMISIÓN - LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	62
TABLA 23 TABLA DE REGRESIÓN LINEAL DUCTO AGUA PROCESO - LÍNEA FUNCIONAL 1 ETAPA 1	63
TABLA 24 COSTOS PREVENTIVOS BOMBA CENTRÍFUGA, SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y DUCTO DE AGUA PROCESO.....	65

TABLA 25 COSTOS CORRECTIVOS BOMBA CENTRÍFUGA, SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y
DUCTO DE AGUA PROCESO..... 65

1. Introducción

El estudio en cuestión, se desarrolla en la unidad de Mantenimiento Mecánico, en la que se busca implementar un sistema basado en la Gestión de Mantenimiento. Lo anterior para disminuir el impacto de la gestión de activos sobre la pérdida del negocio.

En la industria minera, el mantenimiento de activos físicos constituye un factor determinante para asegurar la continuidad operacional, la disponibilidad de los equipos y el cumplimiento de los objetivos productivos. La creciente exigencia por maximizar el rendimiento de los procesos y controlar los costos operacionales ha llevado a que el mantenimiento evolucione desde una función reactiva hacia una disciplina orientada a la gestión de activos, donde la toma de decisiones debe sustentarse en criterios técnicos, económicos y de confiabilidad.

Dentro de este contexto, las fallas de equipos y componentes en procesos críticos generan efectos directos sobre la productividad, la disponibilidad operacional y el costo del negocio. Particularmente en sistemas donde intervienen equipos sometidos a desgaste continuo, como ocurre en el área de Flotación, la ocurrencia de fallas no solo implica costos de reparación, sino también pérdidas por detención de proceso.

En el caso del área de Flotación analizada en este trabajo, se observa que las intervenciones de mantenimiento se desarrollan principalmente bajo una lógica correctiva. Si bien esta práctica permite responder frente a fallas ya ocurridas, no establece un criterio técnico formal que permita definir el momento económicamente más conveniente para intervenir los activos críticos.

La ausencia de una política de mantenimiento estructurada dificulta priorizar técnicamente los equipos de mayor impacto y limita la posibilidad de optimizar el costo global de mantenimiento.

Adicionalmente, las condiciones actuales de operación no permiten implementar de manera inmediata un esquema de mantenimiento basado en condición, debido a que no existe una infraestructura robusta de monitoreo continuo ni umbrales de diagnóstico definidos.

Frente a este escenario, el presente trabajo propone desarrollar una política de mantenimiento basada en confiabilidad para equipos y componentes críticos del área de Flotación, utilizando información histórica de mantenimiento, análisis de criticidad y modelamiento estadístico de fallas mediante

distribución de Weibull. El propósito es establecer un criterio técnico y económico que permita determinar el punto óptimo de intervención, minimizando el costo global de mantenimiento y reduciendo el impacto operacional asociado a fallas imprevistas.

La metodología considera, en una primera etapa, la identificación de modos de falla y su priorización mediante herramientas de criticidad como análisis de Pareto y Jack Knife. Posteriormente, se modela el comportamiento probabilístico de falla de los componentes críticos a través de la distribución de Weibull, validando estadísticamente los resultados obtenidos, definiendo una propuesta de intervención técnicamente sustentada.

La contribución principal de esta investigación radica en entregar una metodología aplicable al contexto real de operación, capaz de transformar datos históricos de mantenimiento en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, permitiendo avanzar hacia una gestión más eficiente de los activos dentro del proceso productivo.

2. Descripción de la problemática

Actualmente en la planta, no existe una política del mantenimiento de los diversos equipos y componentes que participan al interior de las líneas funcionales del área de Flotación magnética, la cual logre asegurar los niveles de producción propuesto, es decir, solo se actúa en función de los datos entregados por el personal de mantenimiento predictivo, el que a través de técnicas predictivas detectan las fallas incipientes en los distintos equipos y/o componentes.

Con dicha información, se logra programar la intervención del equipo y/o componente con un plazo de siete días, o bien, se lleva el componente o equipo a la falla para después de esto intervenir y corregir la condición de este.

Lo anterior, no considera el impacto económico en las pérdidas de producción por la intervención de equipos ni pérdidas económicas en cuanto a la propia intervención en sí.

Sumado a lo anterior, actualmente no se puede optar en el presente por un mantenimiento basado en condición (CBM) a pesar de que se existe el área de mantenimiento preventivo que representa una de las bases del CBM, aún no se consideran los controles ingenieriles disponibles en el mercado, entre otros controles. A pesar de lo anterior, no se descarta la implementación en el corto plazo, combinando en el futuro una política híbrida, combinando intervalo de uso con la inspección por condición.

La política de mantenimiento a proponer basada en edad, resulta actualmente más ejecutable con la información y capacidades disponibles, sin descartar una evolución hacia un esquema CBM o híbrida como se mencionó anteriormente.

Dado los antecedentes actuales, este trabajo se centrará en un modelo de reemplazo basado en confiabilidad, ya que:

- Los datos históricos permiten obtener distribuciones y costos.
- La criticidad económica es alta.
- No existe actualmente en la planta una infraestructura CBM robusta para aplicarla (equipos con sensores de manera permanente).

Ante esto, nace la propuesta de generar una Política de Mantenimiento Preventivo – Correctiva en el cual el impacto en la destrucción del negocio sea el mínimo (intervenciones a bajo costo), dejando el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) como potencial evolución futura en caso de invertir en los puntos descritos anteriormente.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluación técnico-económica de una política de mantenimiento basada en confiabilidad para equipos críticos del área de flotación.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los equipos y componentes críticos del área de Flotación mediante herramientas de análisis de criticidad, considerando frecuencia de falla, tiempo fuera de servicio y costo global de mantenimiento.
- Determinar el comportamiento probabilístico de falla de los equipos y componentes críticos mediante modelos de confiabilidad basados en la distribución Weibull.
- Evaluar la conveniencia técnico-económica de una política de mantenimiento preventivo basada en uso para los equipos críticos, a partir de su comportamiento de confiabilidad y costos asociados

4. Metodología Propuesta

Etapas para Optimización Económica de la Estrategia de Mantenimiento.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente, se realizará la siguiente metodología de trabajo:

- Levantamiento del Proceso.
 - Descripción de Equipos y Componentes.
 - Elaboración de una base de datos en función de los tiempos de funcionamiento, tiempos de reparación, entre otros.
- Desarrollo y Análisis de datos.
 - Aplicación de herramientas de criticidad a Equipos y Componentes.
 - Aplicación de Modelos de Confiabilidad a Equipos y Componentes Críticos.
- Resultados y Conclusiones.
 - Resultados de Confiabilidad de Equipos y Componentes,
 - Resultado Propuesta de Política de Mantenimiento.
 - Impacto Económico de la Política de Mantenimiento.

4.1 Levantamiento del Proceso

En una primera instancia, se realizará un levantamiento donde se identificarán los distintos equipos y componentes involucrados en este trabajo de estudio, indicando su función dentro del sistema en cuestión.

A continuación, se identificará la condición de cada uno de los elementos levantados previamente en cuanto al tipo de mantenimiento que estos poseen según la estrategia actual.

Una vez, identificado el tipo de estrategia de mantenimiento, se dará paso a establecer el modo de falla que afecta a cada equipo o componente del sistema.

Para realizar los distintos estudios cuantitativos, se trabajará con una base de datos extraída a través de un ERP, en la cual se deberán seleccionar; procesar y transformar los distintos datos presentes en dicha base de datos.

A continuación, se presenta una tabla con los datos obtenidos desde el ERP, ver imagen N°1.

Orden	Pto.tbjo.o peración	Texto breve operación	Hh	Denominación de la ubicación técnica	TAG	Tiempo Equipo Detenido	Fecha de Inicio
30481263	CM	CAMBIO/REVISIÓN AIREADORES Y PLATOS	12	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21310-1	10:10:48	08-04-2017
10544040	CM	Revisión camisa eje y cambio packing	6	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-1	3:30:37	27-04-2017
30538050	CM	Cambio correas de transmisión	25	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-2	2:00:00	24-07-2017
30560329	CM	Cambio camisa eje y revisión componentes	30	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-2	7:52:59	24-07-2017
10568330	C3	Cambio válvula descarga manga BUSANC	19,15	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	HA213-HV-102	7:08:25	24-07-2017
10571210	CM	Cambio elastómeros v/v descarga HV-118A	12	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	HA213-HV-118A	6:00:00	28-07-2017
10564940	CM	Cambio elastómeros v/v descarga HV-118B	14	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	HA213-HV-118B	2:00:00	28-07-2017
10578275	CM	Cambio de packing y revisión de camisa	0	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-1	0:37:43	18-08-2017
20079865	CM	cambio de packing	12	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-1	3:20:50	28-08-2017
20079895	CM	Chequeo de caja portarodamiento	9	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-1	2:04:28	28-08-2017
20079914	CM	cambio de caja portarodamiento.	18	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-1	13:01:48	29-08-2017
20079899	C3	rotura cuello cisne celda 2	42	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21310-2	3:49:52	29-08-2017
20080084	C3	rotura en cuello cisne	42	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21310-1	12:02:47	04-09-2017
10576112	CM	Cambio ducto succión bomba	0	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-2	2:00:00	26-09-2017
30573591	CM	Revisión de componentes húmedos	31	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21305-2	12:00:56	26-09-2017
10580550	C3	(S4017)Cambio TEE anillo mataespuma celd	12	LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1	FS21310-2	2:28:55	03-10-2017

Imagen N° 1 Base de datos obtenidas desde el ERP

Los datos analizados presentan las siguientes consideraciones:

- Período analizado de tres años desde 2017 a 2019.
- Análisis de un total de 7 equipos y/o componentes.
- Se extrajo una base de datos con un total 65 órdenes de trabajo (OM) para los equipos y/o componentes a estudiar, donde se encontraban los trabajos ejecutados con intervención de equipos (que serán aquellas órdenes que se analizarán) y aquellas ordenes de trabajo notificadas como “no ejecutado” por no entrega de equipo.
- Se descartaron del estudio aquellas ordenes de trabajo notificadas como “no ejecutado” por no entrega de equipo.
- Solo se analizaron las ordenes de trabajo que fueron ejecutadas con intervención de equipo, las que correspondieron a un total de 49 (ver Tabla 1).

La cantidad de fallas por componente se aprecia en la Tabla 1, siendo el criterio para identificar un evento de falla, la pérdida de la función de este.

LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1

Modo De Falla	N° de Fallas
Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.	14
Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.	12
Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.	4
Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	3
Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.	8
Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda	5
Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión	3

Tabla 1 Número de fallas por Equipo y Componente

Luego de establecer los distintos modos de fallas, se realizará un levantamiento cuantitativo de estos la línea funcional establecida.

4.2 Desarrollo y Análisis de Datos.

Para el desarrollo y análisis de datos, se cuantificará a través del cálculo del costo Global de Mantenimiento, el impacto de cada modo de falla en la línea funcional dentro del Área de Flotación, considerando para esto, tanto los costos de intervención como los costos por falla que genera cada uno de ellos.

Una vez calculados los CGM, se procederá con la realización de un análisis de Pareto en una primera instancia y luego con un análisis Jack Knife, para posteriormente comparar los resultados de ambos y de esta manera establecer aquellos equipos o componentes críticos.

Determinados aquellos componentes o elementos críticos, se realizará un análisis de confiabilidad a través de la distribución estadística de Weibull.

Para la evaluación del ajuste de los datos de falla a la distribución Weibull se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). No obstante, se debe considerar que los parámetros de la distribución Weibull fueron estimados a partir de la misma muestra utilizada posteriormente

para realizar la prueba de ajuste. En estas condiciones, los valores críticos tabulados de la prueba K-S convencional constituyen una aproximación, debido a que su formulación clásica supone que la distribución teórica y sus parámetros se encuentran previamente especificados y no son estimados a partir de los datos analizados.

Por lo anterior, los resultados obtenidos mediante la prueba K-S deben interpretarse como un criterio de apoyo para evaluar la consistencia del modelo Weibull con los datos observados y no como una validación estadística concluyente del modelo.

Métodos complementarios, tales como la prueba de Anderson-Darling o procedimientos de muestreo mediante bootstrap, permitirían realizar una evaluación estadística más rigurosa considerando la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros. Sin embargo, la aplicación de dichos métodos queda fuera del alcance del presente estudio, constituyendo una oportunidad de profundización para trabajos posteriores.

4.3 Resultados.

Una vez obtenidos los equipos y componentes críticos, se procederá a obtener los resultados de los distintos MTTR y MTBF, además de los parámetros de Weibull tanto α como β ; C_p y C_c . Se procederá a mostrar los distintos resultados en función del Presupuesto Anual (t) de la Política de Mantenimiento, la cual se graficará en un gráfico de costos vs tiempo. En esta gráfica, se observarán tres curvas de costos (costo corregido acumulado, costo correctivo y costo preventivo).

Con la información anterior se corroborará el punto donde conviene intervenir (costo preventivo vs correctivo), recomendando una política de mantenimiento basada en confiabilidad $R(t)$ y probabilidad de falla acumulada $F(t)$, encontrando el punto óptimo del mantenimiento optimizando los costos asociados a este.

5. Marco Teórico

5.1 Introducción.

El mantenimiento hoy en día, en lo que es el rubro de la minería tiene un impacto considerable dentro de los costos operacionales al interior de una organización, los cuales se traducen en un porcentaje que fluctúa entre el 20% al 50% de estos. Es por esto, que la mejora continua dentro del proceso de mantenimiento se encuentra cada vez más presente, dando paso a la gestión del mantenimiento.

A continuación, se presentarán las distintas definiciones y conceptos para el entendimiento y comprensión para el desarrollo del presente trabajo.

5.2 Concepto de Mantenimiento.

El mantenimiento se define como la combinación de todas las acciones técnicas y de gestión destinadas a mantener o restaurar un elemento en un estado que le permita funcionar como lo requerido [4]

5.3 Gestión del Mantenimiento.

Se define a la gestión del mantenimiento como aquellas actividades de la gestión que determinan los objetivos del mantenimiento, las estrategias y las responsabilidades, y las realizan por medio de planificación del mantenimiento, control y supervisión del mantenimiento, y mejora de los métodos en la organización incluyendo los aspectos económicos terminología del mantenimiento.

Lo anterior, se reduce principalmente en asegurar la función requerida de diseño del activo al mínimo costo global de mantenimiento. Entendiendo por función requerida la función o combinación de funciones de un elemento que se consideran necesarias para proporcionar un servicio dado.

5.4 Tipos de Mantenimiento.

A continuación, se expondrán los dos tipos de mantenimiento que se abordará en este trabajo, tanto el Mantenimiento Correctivo, el cual es la estrategia que se utiliza actualmente en el Área de Flotación y el Mantenimiento Preventivo, que aquello que se pretende proponer mediante una Política de Mantenimiento.

5.4.1 Mantenimiento Correctivo.

Se define como “reparar fallas funcionales tras su ocurrencia. Se le asocia al mantenimiento correctivo con una tarea No Programada que se lleva a cabo en forma inmediata a la falla funcional para restablecer la función de la máquina. La velocidad con la que debe solucionarse, dependerá directamente de las consecuencias que esta produzca en el negocio” [8].

5.4.2 Mantenimiento Preventivo.

Se define al mantenimiento preventivo como “la intervención cíclica de los equipos (o alguno de sus sistemas) transcurrido cierto tiempo calendario, horas de marcha distancia recorrida, ciclos de operación u otra unidad de medida relacionada con el mecanismo de degradación” [8].

5.5 Conceptos en Gestión de Mantenimiento.

A continuación, se darán a conocer dentro del marco teórico, los distintos conceptos aplicados para el desarrollo de este trabajo, entre ellos, tiempo medio entre fallas, tiempo medio de reparación, disponibilidad, modo de falla, entre otros.

5.5.1 Tiempo Medio Entre Fallas.

Hace referencia al tiempo promedio que un equipo, máquina o planta cumple su función sin interrupción debido a una falla funcional.

También es conocido como el tiempo promedio en que un equipo, línea, etcétera, funciona correctamente hasta que falla y requiere ser reparado nuevamente.

Se obtiene dividiendo el tiempo total de funcionamiento y entre el número de detenciones por falla [10].

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Número de fallas}}$$

El Tiempo Medio Entre Fallas, proporciona el tiempo promedio de operación normal entre fallas, además corresponde a un indicador relacionado a la confiabilidad, ya que a mayor valor de MTBF, mayor confiabilidad representa el sistema.

5.5.2 Tiempo Medio de Reparación.

El Tiempo Medio Para Reparar, es el tiempo promedio que toma reparar o restaurar la función de un equipo, maquinaria, línea o proceso después de una falla funcional.

En este concepto se incluye el tiempo para analizar y diagnosticar la falla, tiempo de planeación de trabajo, entre otros.

Es el intervalo de tiempo obtenido dividiendo el tiempo total de la recuperación y entre el número total de fallas en un sistema [10].

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de recuperación}}{\text{Número de fallas}}$$

Además, *MTTR* es considerado como un indicador de eficiencia de mantenibilidad. Mientras más tarde un sistema en recuperarse ante una falla, este tendrá una menor disponibilidad.

5.5.3 Disponibilidad.

La disponibilidad es un indicador de seguridad de funcionamiento, es decir, es considerado un KPI (Key Performance Indicator) en el método RCM (Reliability Centered Maintenance), también conocido como Mantenimiento Basado en la Fiabilidad.

Disponibilidad física, se define como disponibilidad ligada al mantenimiento según la norma “como el tiempo en que un bien ha estado en condiciones de realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante de tiempo dado o durante un intervalo de tiempo dado, asumiéndose que se disponía de los recursos externos requeridos” [10].

Para esto se utiliza la siguiente fórmula:

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

Df = Disponibilidad Física.

UT = Tiempo en el que el sistema esta realmente disponible para el funcionamiento.

DT = Tiempo fuera de servicio imputable a causas técnicas.

Esta fórmula depende de indicadores los cuales son Tiempo Medio Entre Fallas y Tiempo Medio Para Reparar, los que además son considerados importantes KPI's en el mantenimiento de planta.

5.5.4 Modo de Falla.

Se entiende como modo de falla, las posibles causas que originan una pérdida de función, y que eventualmente pueden ocurrir en alguna de las partes individuales de una máquina como proceso de degradación conocido o aleatorio. [8]

Los modos de fallas, son esenciales a la hora de implementar un Plan de Mantenimiento, ya que son imprescindibles para lograr disponibilidad esperada del activo.

5.5.5 Tasa de Falla.

El concepto de Tasa de falla, es un parámetro estadístico que resulta de observar el comportamiento de una cantidad ensayada de elementos idénticos. Su valor es proporcional al intercalo de tiempo Δt y a la cantidad de elementos que pudieron sobreponerse al fallo hasta t. [8]

La tasa de falla, se define según la siguiente función:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

$f(t)$ = Función de densidad de fallas

$R(t)$ = Confiabilidad del componente

5.5.6 Mantenibilidad.

La mantenibilidad, es un parámetro estadístico que se define como la probabilidad que tiene un ítem en estado de falla de ser diagnosticado y reparado con éxito en un tiempo t , y en el contexto de operación establecido [8].

La mantenibilidad, es un parámetro que se encuentra presente tanto en el mantenimiento correctivo (en el cual la ejecución de reparación es provocada por fallas imprevistas), como en el mantenimiento preventivo (en el cual la mantenibilidad es útil a la hora de programar aquellas tareas que se ejecutan con una frecuencia determinada y con tiempos establecidos).

A continuación, se presentan las leyes de distribución de densidad más conocidas para estudiar la mantenibilidad, en función de fallos y tiempos de reparación.

5.5.7 Confiabilidad.

Para los cálculos probabilísticos a realizar en este trabajo, se utilizará la distribución de Weibull, la cual consta de tres parámetros entre ellos, el parámetro de forma; parámetro de escala y parámetro de localización.

Ante lo anterior, la función queda expresada de la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}}$$

Donde,

$$t - \gamma \geq 0$$

β = parámetro de forma (adimensional)

η también llamada α = parámetro de escala (en unidad de tiempo)

γ = *parámetro de localización (en unidad de tiempo)*

El parámetro de forma β es el indicador del mecanismo de falla y su valor nos indica en qué punto de la curva de la bañera se encuentra el componente analizado:

Para $0 < \beta < 1$ implica fallas prematuras o infantiles.

Para $\beta = 1$ implica fallas constantes y aleatorias.

Para $1 < \beta < 4$ implica falla por deterioro prematuro.

Para $\beta > 4$ implica falla por o deterioro rápido por edad de uso.

El parámetro de escala α es el indicador del tiempo o vida característica. Cuando hay un cambio de magnitud en este parámetro ocurre el mismo efecto en la distribución que un cambio de escala en la abscisa, es decir, para un mismo valor de β y α en una distribución normal; si α incrementa la distribución se contrae y si α disminuye la distribución se expande. Además, α es definida como la edad en la cual el 63,2% de las unidades puede fallar.

El parámetro de localización γ es un indicador del tiempo en que comienza a desgastarse un equipo o componente, por lo que sirve para ubicar el inicio de la distribución a lo largo del eje x.

A continuación, se presenta la curva de confiabilidad junto a los parámetros descritos anteriormente para diferentes valores de β y α , ver Imagen 2:

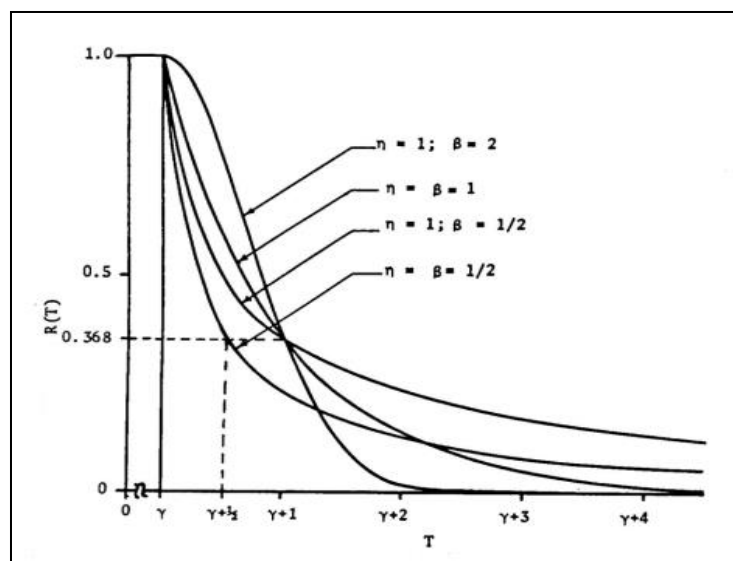


Imagen N° 2 Función de confiabilidad Weibull para varios valores de β

Método de los Mínimos Cuadrados: Este método permite calcular los parámetros de forma y escala por medio de una regresión lineal. Para poder aplicarlo y obtener los parámetros de Weibull se debe obtener, el tiempo entre fallas de todas las fallas que existan.

Estos tiempos entre fallas se deberán ordenar de menor a mayor. A continuación, se presenta en la Tabla 2, un ejemplo de los datos necesarios para realizar la regresión lineal.

N° de Falla	Tiempo de Falla (hr)	Rangos Medianos	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(i))))
i	ti	F(i)	xi	yi
1	1392	0,109375	7,24	-2,155616006
2	3168	0,265625	8,06	-1,175270415
3	3936	0,421875	8,28	-0,601543551
4	5016	0,578125	8,52	-0,147287035
5	7104	0,734375	8,87	0,281917795
6	7272	0,890625	8,89	0,794336831

Tabla 2 Ejemplo Tabla de datos para modelo Weibull – Fuente: Elaboración Propia.

Para minimizar el error en el modelamiento cuando la cantidad de datos es pequeña, se estima la función de distribución F(i) con el método de rangos medianos, el cual se muestra a continuación [6]:

$$F(i) = \frac{(i - 0.3)}{(\sum \text{Fallas} + 0.4)}$$

Los valores de la abscisa x_i , y la ordenada y_i , se calcularon mediante el método de los mínimos cuadrados, señalado a continuación:

$$x_i = \ln(\text{tiempo de falla})$$

$$y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(i)}\right)\right)$$

Luego, para obtener la regresión lineal, se debe graficar los valores de la Tabla 2, para obtener el error cuadrático de la función.

La comprobación del Modelo de Weibull se realizará a través del Test de Kolmogorov-Smirnov, proponiendo la hipótesis de que los valores a analizar obedecen a la distribución de Weibull, obteniendo los parámetros asociados a dicha ley.

Se utilizará el test de Kolmogorov-Smirnov, para validar el modelo, el cual puede ser aplicado a cualquier número de observaciones y se basa en comparar la verdadera función de distribución con la dada por la ley propuesta. Se utilizan los valores absolutos de las diferencias entre punto y punto [6]

Para lo anterior, se deben tener los datos que se presentan en la Tabla 3.

i	Ti	F(i)	F(t)	Dni
1	1392	0,109375	0,078052709	0,031322291
2	3168	0,265625	0,259567822	0,006057178
3	3936	0,421875	0,378226274	0,043648726
4	5016	0,578125	0,563676991	0,014448009
5	7104	0,734375	0,857649291	0,123274291
6	7272	0,890625	0,873480145	0,017144855

Tabla 3 Tabla de datos para Test Kolmogorov-Smirnov – Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

$$F(i) = \frac{(i - 0.3)}{(\sum Fallas + 0.4)}$$

$$F(t) = \text{Dist. Norm. Estand} \left(\frac{\text{Tiempo de falla}_i - \bar{X}_{\text{tiempo de falla}}}{\sigma_{\text{tiempo de falla}}} \right)$$

$\bar{X}_{\text{tiempo de falla}}$ = Media entre los tiempo entre falla

$\sigma_{\text{tiempo de falla}}$ = Desviación estandar entre los tiempo entre falla

$$Dni = |F(i) - F(t)|$$

Una vez obtenido el D_{ni} en las distintas filas, se debe ubicar el mayor D_{ni} y comparar con el D_{ni} obtenido en tabla según la cantidad de datos observados, según el nivel de significancia esperado (ver Tabla 4).

Ante la comparación descrita anteriormente, con un nivel de significancia de 5 %, no se rechaza la hipótesis de que los datos son compatibles con una distribución Weibull.

$$D_{(n,\alpha)} > D_{ni \text{ máximo de tabla}}$$

	α				
n	0.001	0.01	0.02	0.05	0.1
1		0.99500	0.99000	0.97500	0.95000
2	0.97764	0.92930	0.90000	0.84189	0.77639
3	0.92063	0.82900	0.78456	0.70760	0.63604
4	0.85046	0.73421	0.68887	0.62394	0.56522
5	0.78137	0.66855	0.62718	0.56327	0.50945
6	0.72479	0.61660	0.57741	0.51926	0.46799
7	0.67930	0.57580	0.53844	0.48343	0.43607
8	0.64098	0.54180	0.50654	0.45427	0.40962
9	0.60846	0.51330	0.47960	0.43001	0.38746
10	0.58042	0.48895	0.45662	0.40962	0.36866
11	0.55588	0.46770	0.43670	0.39122	0.35242
12	0.53422	0.44905	0.41918	0.37543	0.33815
13	0.51490	0.43246	0.40362	0.36143	0.32548
14	0.49753	0.41760	0.38970	0.34890	0.31417
15	0.48182	0.40420	0.37713	0.33760	0.30397
16	0.46750	0.39200	0.36571	0.32733	0.29471
17	0.45440	0.38085	0.35528	0.31796	0.28627
18	0.44234	0.37063	0.34569	0.30936	0.27851
19	0.43119	0.36116	0.33685	0.30142	0.27135
20	0.42085	0.35240	0.32866	0.29407	0.26473
25	0.37843	0.31656	0.30349	0.26404	0.23767
30	0.34672	0.28988	0.27704	0.24170	0.21756
35	0.32187	0.26898	0.25649	0.22424	0.20184
40	0.30169	0.25188	0.23993	0.21017	0.18939
45	0.28482	0.23780	0.22621	0.19842	0.17881
50	0.27051	0.22585	0.21460	0.18845	0.16982
Over 50	1.94947/ $\sqrt{n}$	1.62762/ $\sqrt{n}$	1.51743/ $\sqrt{n}$	1.35810/ $\sqrt{n}$	1.22385/ $\sqrt{n}$

Tabla 4 Tabla de K-S

En caso contrario, la hipótesis se rechaza, dejando nulo los modelos de confiabilidad y tasa de falla.

Confiabilidad de Weibull: La curva de confiabilidad se construye de la siguiente manera en función de la siguiente ecuación [6].

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

A continuación, se representa la gráfica de confiabilidad (ver Gráfico 1).

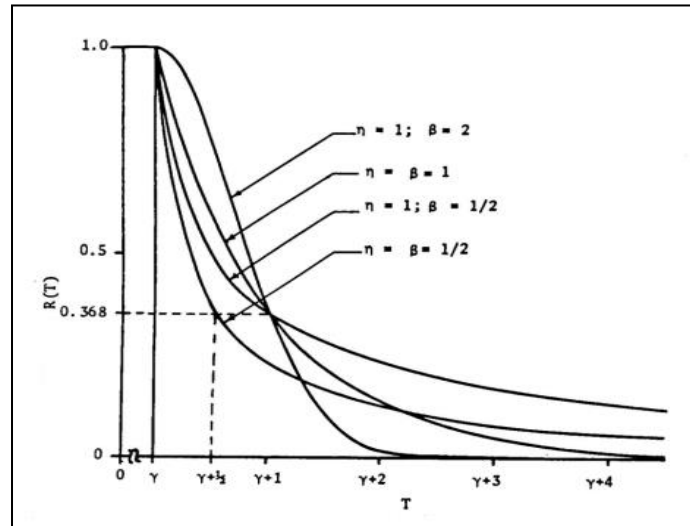


Gráfico 1 Curva de Confiabilidad de Weibull para distintos β .

Tasa de Falla de Weibull: La Tasa de Falla, se construye de la siguiente manera en función de la siguiente ecuación [6]

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

A continuación, se representa la gráfica de tasa de falla (ver Gráfico 2).

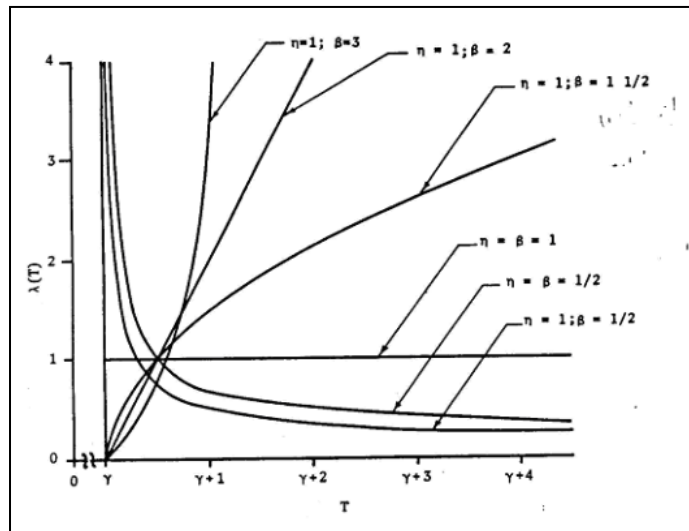


Gráfico 2 Curva de Tasa de Falla de Weibull para distintos β .

5.6 Análisis de Falla y Criticidad.

A continuación, se expondrán diversas metodologías para el análisis de fallas y para el cálculo de criticidad de equipos y componentes en cada una de las líneas funcionales.

5.6.1 Diagrama de Bloques de Confiabilidad.

El diagrama de bloques de confiabilidad es una herramienta de cálculo y de esquema representativo utilizada para confeccionar modelos de confiabilidad y disponibilidad para sistemas [2].

La estructura de un diagrama de bloques de confiabilidad define la interacción lógica de las fallas dentro de un sistema y no necesariamente la conexión lógica o física entre ellas.

Cada bloque puede representar un componente individual, un subsistema u otra falla representativa. El diagrama puede representar todo un sistema o cualquier subconjunto o combinación del sistema que requiera un análisis de fallas, confiabilidad o disponibilidad.

También puede servir como herramienta de análisis para revelar el funcionamiento de cada elemento del sistema o el modo en que cada elemento puede afectar el funcionamiento del sistema en su conjunto.

5.6.2 Análisis de Pareto.

Este principio establece que la mayoría de los efectos proceden de muy pocas causas. En términos cuantitativos, el 80% de los problemas proceden del 20% de las máquinas, materias primas o procedimientos. En su metodología, Juran llamó a este 20% de causas las “pocas y vitales” y al resto “muchas y triviales”.

Un gráfico de Pareto es un diagrama especial de barras que ayuda a determinar que problemas resolver y en qué orden.

De este gráfico se obtiene un mayor beneficio tratando aquellos pocos problemas identificados con las barras más altas que los muchos identificados con barras más bajas.

A continuación, se presenta un ejemplo de la gráfica de Pareto, ver Gráfico 3.

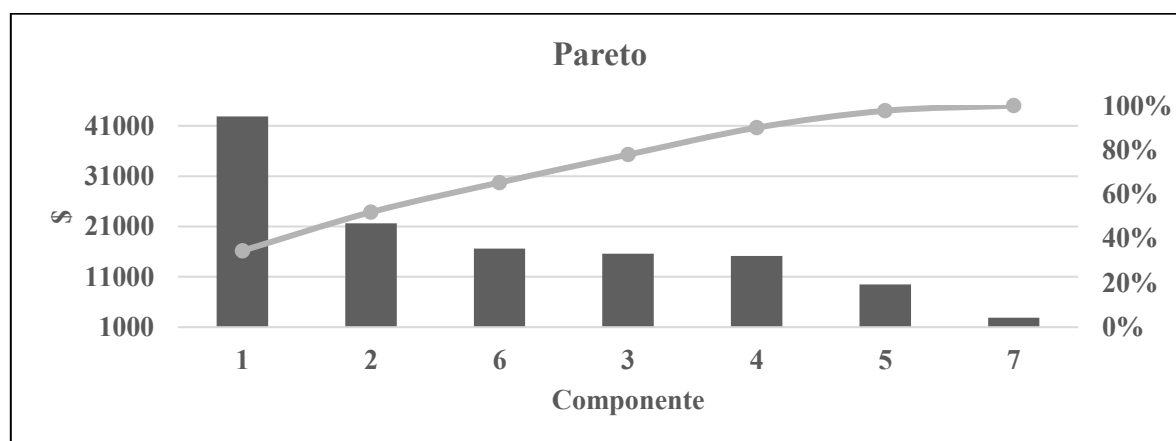


Gráfico 3 Diagrama de Pareto (Fuente: Elaboración Propia).

5.6.3 Análisis Jack Knife.

El método de análisis Jack Knife es un estudio multicriterio de las distintas variables involucradas, o que inciden en los modos de falla, tales como: frecuencia de ocurrencia de falla (tasa de falla promedio), número de fallas, tiempo fuera de servicio (*MTTR*), costos asociados, entre otros [3].

El mecanismo en sí de análisis, es un diagrama en dos o más dimensiones, en donde cada una de éstas corresponde a una variable de estudio.

En el caso de trabajar con números de falla y tiempo fuera de servicio, en el gráfico se trazan líneas de referencia que denotan el número promedio de fallas y el tiempo promedio de reparación de los modos de falla, generando cuatro cuadrantes. Los modos de falla ubicados en el primer cuadrante son aquellos que poseen un número de fallas mayor al promedio (crónicos) y un tiempo fuera de servicio mayor al promedio (agudos), por lo que son candidatos importantes en la escala de criticidad.

Adicionalmente, se puede(n) trazar una(s) recta(s) de iso-indisponibilidad de manera que se identifiquen los modos de falla que generen una indisponibilidad mayor a la planteada/esperada. Para esto, por lo general se utilizan escalas logarítmicas para que las líneas de iso-indisponibilidad (D) sean rectas.

Para mayor detalle, ver Gráfico 4, y donde se grafican (escala logarítmica) las coordenadas (número de fallas y *MTTR*) de algunos modos de fallas.

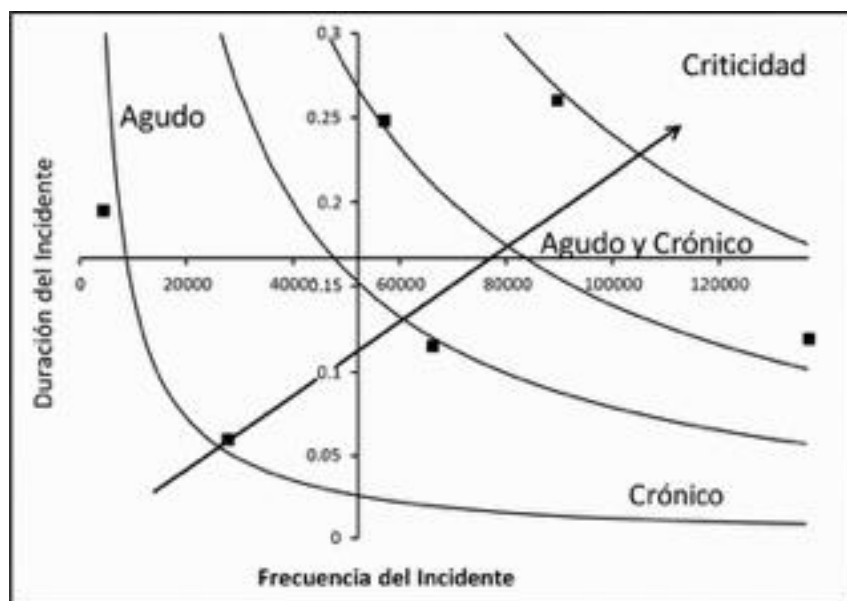


Gráfico 4 Gráfico de Criticidad Jack Knife (Fuente: Elaboración Propia).

Donde:

$MTTR_i$ = Tiempo medio de reparación del modo de falla i .

$N^{\circ}i$ = Número de intervenciones del modo de falla i .

N = Número de modos de falla del equipo

Promedio del logaritmo del número de N Intervenciones de los N modos de falla

$$\frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}(N^{\circ}i)}{N}$$

Promedio del logaritmo del tiempo medio N - de reparación de los N modos de falla

$$\frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}(MTTRi)}{N}$$

Las propuestas de mejora, según la distribución de los modos de falla/equipos/subsistemas en el gráfico, darán la pauta para enfrentar el problema desde el punto de vista de la confiabilidad, producto de la alta frecuencia de intervención, o bien desde la mantenibilidad, dados los altos tiempos medios de reparación.

5.7 Estructura de Costos.

A continuación, se dará a conocer el marco teórico de la estructura de costos que se calculará y analizará en este trabajo a través del Costo Global de Mantenimiento, el que tiene por sigla CGM.

5.7.1 Costo Global de Mantenimiento.

Al costo Global de Mantenimiento “la norma francesa define el Costo Global de Mantenimiento CGM, como la suma de cuatro componentes” [6]:

Costo de intervenciones C_i

Costo de falla C_f

Costo de almacenamiento C_a

Costo de sobre-inversiones C_{si}

Por ende,

$$CGM = C_i + C_f + C_a + C_{si}$$

Costo de intervenciones (C_i): Incluye los costos relacionados tanto a los mantenimiento correctivos como preventivos, y se compone por:

- Costo de mano de obra.
- Costo de repuestos.
- Costo de insumos

$$C_i = \text{Costo}_{\text{mano de obra}} + \text{Costo}_{\text{repuestos}} + \text{Costo}_{\text{insumos}}$$

Costo de falla C_f : Hace referencia al costo valorado por pérdida de utilidades, el que será considerado como el volumen perdido de producción sin opción de recuperar.

$$\text{Costo de la Falla} = \text{ingresos no percibidos} + \text{gastos extras de producción} + \text{materia prima no utilizada}$$

Costo de almacenamiento C_a : Este costo, se encuentra en función de los gastos incurridos en el financiamiento como en el manejo de inventarios tanto de repuestos como de insumos.

Costo de sobre-inversiones C_{si} : Costo relacionado con los gastos incurridos en el diseño inicial de una planta.

5.8 Política de Mantenimiento

la Política de Mantenimiento propuesta será preventiva, enfocada en la sustitución de elementos antes de la falla.

Este modelo, analizará la confiabilidad de los componentes en estudio combinado con el costo global de la intervención o mantención (suma de los costos directos y costos de ineficiencia).

La política propuesta permite realizar intervenciones correctivas imprevistas por intervenciones programadas de menor costo.

Lo anterior permiten identificar ventanas de intervención técnicamente convenientes antes de alcanzar niveles críticos de probabilidad de falla.

5.8.1 Modelo mantención preventiva a edad constante.

Este modelo se basa en que el componente se sustituirá en el momento en alcance cierta edad o tiempo de uso. El periodo de sustitución, transcurrirá desde la última intervención, sea esta preventiva o correctiva [1].

$$CTM = \frac{Cp * R(t) + Ce[1 - R(t)]}{MTBF(tp)}$$

El Costo Preventivo, se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Costo Preventivo}(Cp) = \text{Repuesto} + \text{Costo mano de obra} * \text{Tiempo de detención}$$

Por otra parte, el costo de emergencia, se define de la siguiente manera:

$$\text{Costo de Emergencia}(Ce) = \text{Costo Preventivo} + \text{Costo de Ineficiencia} * \text{Tiempo de detención}$$

La confiabilidad viene determinada por la ecuación:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Por último, $MTBF(ti)$, viene dado por lo siguiente:

$$MTBF(i) \approx MTBF_{i-1} + A_i$$

Donde A_i , corresponde a:

$$A_i = \frac{R(t_{i-1}) + R(t_i)}{2} (t_i - t_{i-1})$$

6. Desarrollo del Tema

6.1 Descripción de Equipos y Componentes Área de Flotación.

A continuación, se presentan los elementos de estudio que se analizarán en este trabajo:

- **Bomba Centrífuga:** Utilizada para desplazar fluidos con porcentaje de sólidos en su composición, convirtiendo la energía potencial en energía mecánica.
- **Sistema de Transmisión por Poleas:** Conjunto armado por una polea motriz y una polea conducida, las que se conectan mediante correas de transmisión, con el fin de transmitir la energía del motor a la caja porta rodamientos.
- **Caja Porta Rodamientos:** Su función principal es la de transmitir la energía desde el sistema de transmisión por poleas al eje de la bomba.
- **Conjunto Cabezal Celda de Flotación:** Es un elemento donde se produce el contacto burbuja-partícula, la adhesión entre ellas y la separación selectiva de estas.
- **Ducto Agua Proceso:** Su función es alimentar a la celda de flotación con agua de proceso para mantener los niveles de sólidos deseados al interior de esta.
- **Ducto Descarga y Recirculación Celda:** Ducto por el cual circula el material procesado desde la celda de flotación hacia la segunda etapa de clasificación, además, recircula el material cuando los niveles de los estanques se encuentran con altos niveles de material.
- **Ducto de Succión:** Ducto que se acopla desde la descarga de la bomba hacia la línea de concentrado.

6.2 Condición de Mantenimiento de Equipos y Componentes.

Actualmente, el Área de Flotación no cuenta con un Plan de Mantenimiento Programado, las tareas de mantenimiento que se ejecutan son principalmente de carácter correctivo, es decir, se espera que el equipo o componente falle para realizar el cambio o reparación de estos.

En la Tabla 5, se señalan los equipos y componentes, seguido de su modo de falla y la descripción del tipo de mantenimiento que aplica.

Componente	Modo de Falla	Tipo de Mantenimiento: Correctivo
Bomba Centrífuga.	Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.	Cambio de componentes.
Sistema de Transmisión por Poleas.	Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.	Cambio de correas.
Caja Porta Rodamientos.	Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.	Cambio de caja porta rodamientos.
Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	Cambio de componentes interno.
Ducto Agua Proceso.	Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.	Reparación ducto
Ducto Descarga y Recirculación Celda	Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda	Cambio de ducto
Ducto de Succión	Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión	Cambio de ducto

Tabla 5 Modo de Falla y Tipo de Mantenimiento según Componentes.

A continuación, se presenta la frecuencia de intervención de los equipos y componentes presentes en la línea funcional del Área de Flotación.

En la Tabla 6, se logra observar que las mayores intervenciones promedio, se focalizan principalmente en los siguientes modos de fallas:

- Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.
- Falla Elementos Sistema de Transmisión por poleas
- Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.

LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1

Modo De Falla	N° de Fallas por año
Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.	5
Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.	4
Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.	1
Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	1
Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.	3
Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda	2
Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión	1

Tabla 6 Cuantificación de Modos de Fallas en Línea Funcional N°1 Etapa 1

6.3 Análisis de Falla y Criticidad de Equipos y Componentes.

A continuación, se determinará mediante un análisis de fallas y criticidad en el Área de Flotación aquellos equipos y componentes críticos, para posteriormente aplicar el modelo de confiabilidad de Weibull, según los resultados obtenidos al comparar entre los distintos análisis de criticidad los distintos modos de fallas.

6.3.1 Diagrama de Bloques de Confiabilidad.

Al momento de realizar el levantamiento de los diagramas de bloques de confiabilidad en el Área de Flotación, se determinó la siguiente configuración para la línea funcional, ver Imagen 3.

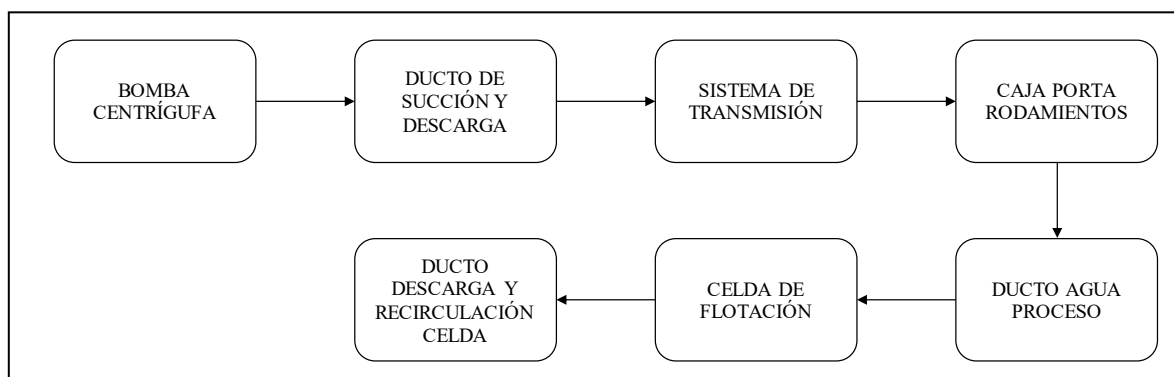


Imagen N° 3 Configuración en serie de Equipos y Componentes de Líneas Funcionales.

El diagrama de bloques de confiabilidad anteriormente señalado, presenta una configuración en serie, ante lo cual, la caída de cada elemento dentro del sistema, provoca una caída total del sistema.

6.3.2 Análisis de Costo Global de Mantenimiento.

Parte fundamental para la propuesta de una Política de Mantenimiento es la evaluación económica de esta y el impacto que pueda tener dentro del presupuesto de la empresa.

Tal como se abordó en el marco teórico, la fórmula para el cálculo del Costo Global de Mantenimiento es la siguiente:

$$CGM = C_i + C_f + C_a + C_{si}$$

Sin embargo, para el desarrollo de este trabajo, se realizarán las siguientes consideraciones:

- El costo de almacenamiento no será considerado para el cálculo del Costo Global, puesto que solo representa alrededor de un 4% de este.
- El costo de sobre inversión, no se considerará dentro del cálculo del Costo Global de Mantenimiento, ya que no se está evaluando la opción de adquirir un equipo en reemplazo de otro.

Por ende, considerando lo siguiente, se procederá a calcular el Costo Global de Mantenimiento de la siguiente manera:

$$CGM = C_i + C_f$$

Siendo C_i dado por la siguiente ecuación:

$$C_i = C_{mano\ de\ obra} + C_{repuestos} + C_{insumos}$$

Para el cálculo del costo de intervención, se realizarán las siguientes consideraciones:

- El costo de mano de obra, será netamente el calculado para el personal de la compañía, sin considerar el costo de mano de obra por parte de personal externo. Para este caso será de $10 \frac{USD}{HH}$.
- El costo de repuesto, será tomado como referencia aquel valor que este presentaba al día en fue provisto para la intervención.
- El costo de insumos no será considerado, puesto que es insignificante frente a la magnitud de las demás variables en cuestión.
- TMS/H: También conocido como tonelada métrica seca hora, el cual es un factor de producción operacional, el que varía de acuerdo al área en que se encuentren las distintas líneas funcionales.

Para este trabajo, el factor adoptará el valor de 46,1 tms/hr. Este valor fue obtenido mediante un trabajo de investigación realizado por el Área de Ingeniería de Procesos, los cuales analizaron y estudiaron el impacto comercial por tonelada métrica seca hora producida en las distintas áreas.

- USD\$/TMS: Es el indicador económico que resuelta del producto de TMS/hr multiplicado por una constante del valor de producción en este caso de USD\$/TMS=20 (corresponde al costo valorado por pérdida de utilidades), el cual es el valor entregado por el área de ingeniería de procesos. Este valor se encuentra asociado a hora de no producción.
- Para el cálculo del costo de falla, se considerará aquel caso en el que el volumen perdido de producción no podrá ser recuperado [6], por ende, para el costo de falla se realizará la siguiente consideración:
 - Se considerará como costo de ineficiencia, al hecho de sufrir una detención imprevista en el normal funcionamiento del proceso productivo. En otras palabras, es el costo valorado por pérdida de utilidades, dado que la operación de la planta es 24 horas al día, sin margen de recuperar la producción perdida.
 - El costo de ineficiencia, estará en función de las toneladas perdidas por hora de detención, tanto de un equipo como de una línea funcional.

Costo de la Falla = ingresos no percibidos + gastos extras de producción + materia prima no utilizada

En nuestro caso, se realizará la consideración que los gastos extras de producción y de materia prima no utilizada será de cero.

$$\text{Costo de la Falla} = \text{Horas de detencion (hr)} * \text{N}^{\circ} \text{ de Fallas} * 46,1 \left(\frac{\text{tms}}{\text{hr}} \right) * 20 \left(\frac{\text{USD\$}}{\text{tms}} \right)$$

6.3.2.1 Análisis de Costo Global de Mantenimiento según modo de falla.

Considerando lo expuesto anteriormente, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para la Línea Funcional N°1 Etapa 1, ver Tabla 7.

Modo De Falla	Hrs de Detención	N° de Fallas	N° Trab.	Costo Repuesto	Costo intervención	Costo falla	CGM (USD/Evento)	CGM Acumulado (USD/Evento)
Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.	6	5	4	14000	15200	27660	42860	42860
Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.	5	4	2	2800	3200	18440	21640	64500
Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.	10	1	4	6000	6400	9220	15620	80120
Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	8	1	3	7500	7740	7376	15116	95236
Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.	3	3	2	1000	1180	8298	9478	104714
Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda	7	2	5	3000	3700	12908	16608	121322
Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión	2	1	2	1000	1040	1844	2884	124206

Tabla 7 Costos Globales Mantenimiento por Modo de Falla Línea Funcional 1 Etapa 1

En la tabla anterior, se logra apreciar que existen fallas que tienen mayor frecuencia que otras, sin embargo, el Costo Global de Mantenimiento es menor que aquellas con fallas menos frecuentes, las cuales son evaluadas por hora.

Los mayores *CGM*, son los asociados a los modos de fallas desgaste de componentes húmedos bomba centrífuga y falla de elementos sistema de transmisión por poleas.

6.3.3 Análisis de Pareto a los Modos de Fallas.

Utilizando los datos obtenidos en el apartado anterior, se realizó un análisis de Pareto a la línea funcional según su modo de falla asociado, considerando para ello los Costos Generales del Mantenimiento.

A continuación, se presenta la Tabla 8, en la cual se dan a conocer los datos correspondientes al Análisis de Pareto de la Línea Funcional N°1 Flotación Etapa 1, en función de CGM.

LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1

Modo de Falla	Item N°	CGM (USD/Evento)	% CGM	% CGM Acumulado
Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.	1	42860	35%	35%
Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.	2	21640	17%	52%
Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda	6	16608	13%	65%
Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.	3	15620	13%	78%
Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	4	15116	12%	90%
Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.	5	9478	8%	98%
Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión	7	2884	2%	100%

Tabla 8 Porcentaje de Incidencia de los Modos de Falla en Línea Funcional 1 Etapa 1

Utilizando los datos de la tabla anterior, se obtiene el diagrama de Pareto, en donde el eje de la ordenada lado izquierdo indica el *CGM* en \$USD, el eje de la ordenada lado derecho, indica los porcentajes acumulados de los distintos modos de fallas y en el eje de la abscisa indica cada uno de los distintos modos de fallas.

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto correspondiente al impacto del *CGM* por cada modo de falla de la Línea Funcional N°1 Flotación Etapa 1 (ver Gráfico 5).

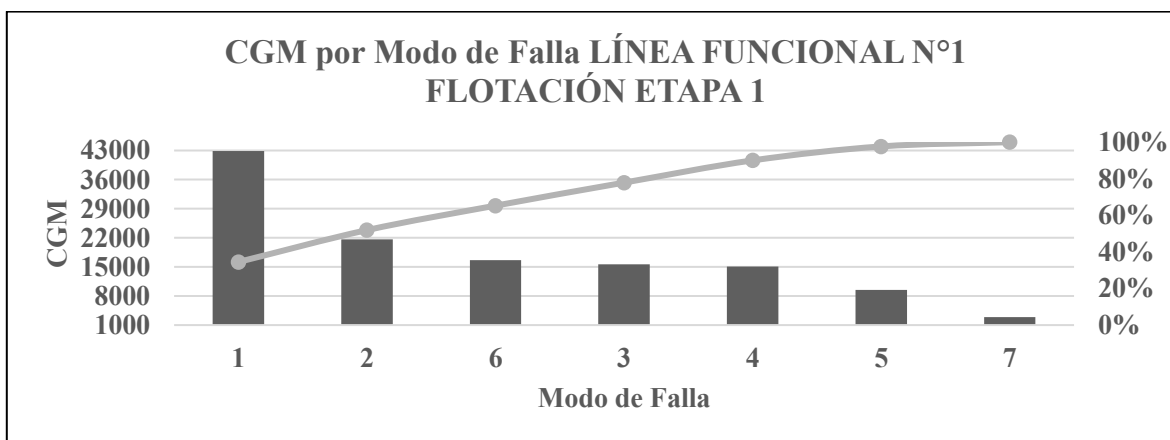


Gráfico 5 Diagrama de Pareto Modos de Fallas Línea Funcional 1 Etapa 1

Según el gráfico anterior, se desprende que aproximadamente el 80% de los costos de la línea funcional, se encuentran asociado a los siguientes modos de fallas:

- (1) Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.
- (2) Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.
- (3) Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda.
- (4) Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.

6.3.4 Análisis Jack Knife a los Modos de Fallas Correctivos.

En este apartado se realizará un análisis de criticidad a través de la herramienta Jack Knife, en la cual se considerarán los modos de fallas, cantidad de fallas, frecuencia de fallas, Tiempo Medio Para Reparar (*MTTR*), Tiempo Fuera de Servicio (TFS) y la Indisponibilidad.

Por otra parte, para graficar los datos anteriormente señalados, además se deberán establecer los límites del tiempo fuera de servicio (LTFS) y los límites de la frecuencia de falla (LFf), junto con los puntos de la curva de iso-indisponibilidad.

Para realizar el análisis Jack Knife, se establece como periodo de estudio desde el año 2017 al año 2019, es decir, tres años.

En la Tabla 9, se logran visualizar los datos necesarios para elaborar el diagrama de criticidad Jack Knife correspondiente a la Línea Funcional N°1 Etapa 1.

LÍNEA FUNCIONAL N°1 FLOTACIÓN ETAPA 1

Modo De Falla	Ítem	N° de Fallas	Frecuencia de Falla 1/(periodo)	MTTR (hr)	TFS (Periodo)	D
Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.	1	14	5	6	0,0006	0,0029
Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.	2	12	4	5	0,0005	0,0018
Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.	3	3	1	10	0,0001	0,0001
Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.	4	3	1	9	0,0001	0,0001
Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.	5	8	3	3	0,0003	0,0010
Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda	6	6	2	6	0,0002	0,0005
Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión	7	3	1	2	0,0001	0,0001

Tabla 9 Datos Constructivos Jack Knife Línea Funcional 1 Etapa 1

A continuación, se enseñará el cálculo del límite de TFS, a partir de la siguiente ecuación:

$$LTFS = \frac{\sum TFS}{N^{\circ} \text{ de Modos de Fallas}} = 0,0003$$

Luego de calcular el LTFS, se procederá a realizar el cálculo del límite de Ff, a partir de la siguiente ecuación:

$$LFf = \frac{\sum Ff}{N^{\circ} \text{ de Modos de Fallas}} = 2,4286$$

Los puntos de la curva de iso-indisponibilidad son los siguientes:

$$Punto 1_{[x,y]} = [1; 0,0009]$$

$$Punto 2_{[x,y]} = [1; 0,0002]$$

Graficando los valores tabulados en la tabla anterior y considerando los valores de los resultados obtenidos de los cálculos anteriores, se obtiene el siguiente gráfico Jack Knife con sus respectivos límites y su curva de iso-indisponibilidad.

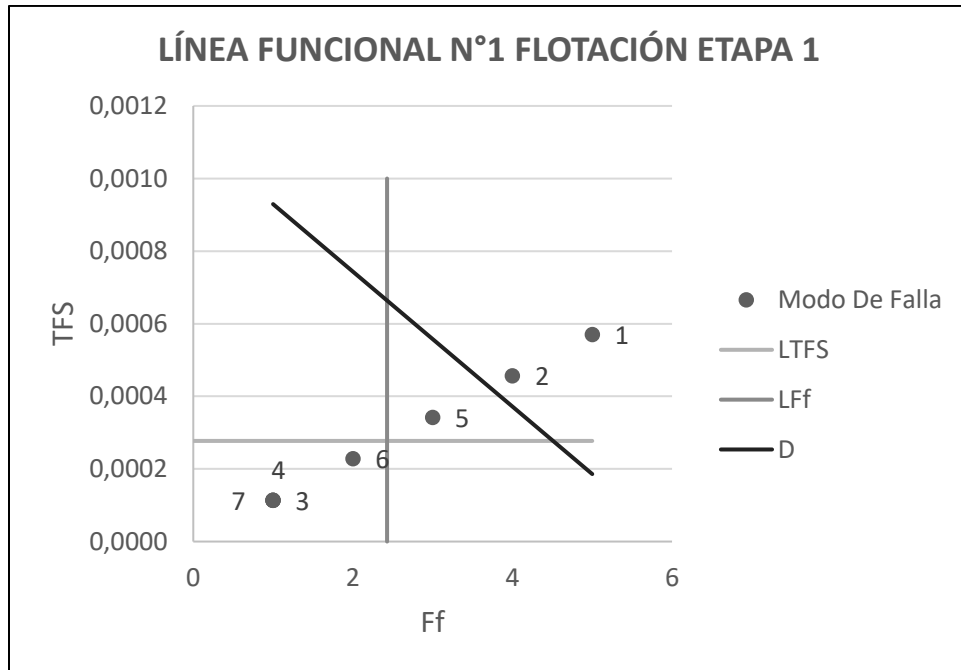


Gráfico 6 Gráfica Jack Knife Línea Funcional 1 Etapa 1

Desde el Gráfico 6, se puede observar lo siguiente:

- Los modos de falla que se encuentran por sobre la curva D (iso-indisponibilidad), generan una mayor indisponibilidad en la línea funcional, ante lo cual son considerados como los más críticos.
- Se logra apreciar que tanto en el cuadrante A y B, no se sitúa ningún punto, es decir, no hay modos de falla considerados solamente agudos ni solamente crónicos.
- Los modos de falla que son considerados como bajo control, por estar en el cuadrante D, son los siguientes:
 - (3) Falla de Rodamientos Caja Porta Rodamientos.
 - (4) Desgaste componentes internos Conjunto Cabezal Celda de Flotación.
 - (6) Rotura por pérdida de espesor Ducto Descarga y Recirculación Celda.
 - (7) Rotura por pérdida de espesor Ducto de Succión.

- Los modos de fallas que se encuentran en el cuadrante C, que son considerados como crónicos y agudos por tener un alto tiempo de reparación y una alta ocurrencia, son los siguientes:
 - Desgaste de Componentes Húmedos Bomba Centrífuga.
 - Falla Elementos Sistema de Transmisión por Poleas.
 - (5) Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.

6.3.5 Criterio final de selección de componentes críticos.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de Pareto y el diagrama Jack Knife no identifican exactamente el mismo conjunto de modos de falla críticos, debido a que ambas herramientas consideran criterios de priorización diferentes. El análisis de Pareto permite identificar aquellos modos de falla que presentan una mayor contribución al Costo Global de Mantenimiento (CGM), mientras que el análisis Jack Knife evalúa conjuntamente la frecuencia de ocurrencia y el impacto asociado al tiempo fuera de servicio e indisponibilidad.

En el análisis de Pareto, los modos de falla asociados al desgaste de componentes húmedos de la bomba centrífuga, falla de elementos del sistema de transmisión por poleas, rotura por pérdida de espesor del ducto de descarga y recirculación de celda y falla de rodamientos de la caja porta rodamientos concentran aproximadamente el 80 % del Costo Global de Mantenimiento.

Por otra parte, mediante el análisis Jack Knife se identificó que el desgaste de componentes húmedos de la bomba centrífuga, la falla de elementos del sistema de transmisión por poleas y la rotura por pérdida de espesor del ducto de agua de proceso se encuentran en la zona correspondiente a modos de falla crónicos y agudos, caracterizándose por presentar conjuntamente una mayor frecuencia de ocurrencia y un mayor impacto sobre la indisponibilidad de la línea funcional.

Considerando lo anterior, para la selección final de los componentes sometidos al modelamiento de confiabilidad se adoptó como criterio principal la clasificación obtenida mediante Jack Knife, complementada con los resultados económicos entregados por el análisis de Pareto y el Costo Global de Mantenimiento. De esta manera, el análisis de Pareto se utiliza como herramienta de priorización económica, mientras que Jack Knife permite establecer la criticidad operacional asociada a la recurrencia y al impacto de las fallas.

Bajo este criterio se seleccionaron para el modelamiento mediante distribución de Weibull los siguientes modos de falla: desgaste de componentes húmedos de la bomba centrífuga, falla de elementos del sistema de transmisión por poleas y rotura por pérdida de espesor del ducto de agua de proceso. Lo anterior, dado que se dará prioridad a la estabilización en el proceso de las fallas para asegurar la continuidad operacional.

Modo de falla / componente	Pareto / CGM	Resultado Jack Knife	Decisión	Justificación
Componentes húmedos Bomba Centrífuga	Sí · USD 42.860	Crónico y agudo	INCLUIR	Mayor CGM, 15 fallas y alta recurrencia; crítico en ambas perspectivas.
Sistema de Transmisión por Poleas	Sí · USD 21.640	Crónico y agudo	INCLUIR	Alta contribución económica, 12 fallas y criticidad operacional.
Ducto Agua Proceso	No · USD 9.478	Crónico y agudo	INCLUIR	Aunque queda fuera del 80 % de Pareto, registra 9 fallas y Jack Knife lo clasifica crítico.
Ducto Descarga y Recirculación Celda	Sí · USD 16.608	Bajo control	EXCLUIR	Aporta al 80 % del CGM, pero Jack Knife no evidencia criticidad operacional equivalente.
Caja Porta Rodamientos	Sí · USD 15.620	Bajo control	EXCLUIR	CGM relevante, pero baja recurrencia (3 fallas) y clasificación bajo control.
Conjunto Cabezal Celda de Flotación	No · USD 15.116	Bajo control	EXCLUIR	No pertenece al grupo Pareto 80 % y Jack Knife lo mantiene bajo control.
Ducto de Succión	No · USD 2.884	Bajo control	EXCLUIR	Bajo impacto económico, baja recurrencia y condición bajo control.

Tabla 10 Tabla final de priorización de modos de falla para modelamiento de confiabilidad. Fuente: Elaboración Propia.

Si bien el ducto de descarga y recirculación de celda y la caja porta rodamientos se encuentran dentro del grupo de mayor contribución económica identificado mediante Pareto, ambos se clasifican en Jack Knife dentro de la zona de modos de falla bajo control, razón por la cual no fueron considerados dentro del grupo final sometido al modelamiento de confiabilidad.

Por su parte, el ducto de agua de proceso no se encuentra dentro del grupo que concentra aproximadamente el 80 % del CGM en el análisis de Pareto; sin embargo, presenta nueve fallas durante el período analizado, una frecuencia promedio de tres fallas por año y se posiciona mediante Jack Knife dentro de la categoría de modos de falla crónicos y agudos. En consecuencia, su comportamiento operacional justifica su incorporación al análisis de confiabilidad.

La aplicación conjunta de ambas herramientas permite, por tanto, evitar que la selección de componentes críticos dependa exclusivamente de su impacto económico o de su frecuencia de falla, estableciendo una priorización que considera tanto las consecuencias económicas como el comportamiento operacional de los modos de falla.

6.3.6 Modelo de Confiabilidad a los Modos de Fallas Críticos.

En este apartado, se realizará un análisis de confiabilidad a través de la distribución estadística de Weibull.

Para validar la cantidad de datos con los que se trabajará para cada uno de los casos a estudiar, se utilizará la validación de los modelos por medio del Test de Kolmogorov-Smirnov, dado que la base de datos en algunos casos no es tan robusta desde el punto de vista estadístico.

A continuación, se presentará el análisis de Weibull, la validación del modelo, la curva de confiabilidad, el *MTBF*, y la tasa de falla para cada uno de los modos de fallas según las líneas funcionales en estudio.

6.3.6.1 Aplicación Modelo de Weibull en Línea Funcional N°1 Etapa 1.

En el Anexo 1.1, se logra apreciar para la Línea Funcional N°1 Etapa 1, el cálculo de los distintos rangos medianos, entre ellos, $F(t)$; x_i ; y por último y_i , de todos los componentes del sistema determinados críticos en dicha línea Funcional tales como, Bomba Centrífuga (ver Tabla 21), Sistema de Transmisión (ver Tabla 22) y Ducto Agua Proceso (ver Tabla 23).

A continuación de lo anterior, se realizó el análisis de regresión lineal para estimar el error cuadrático en cada uno de los elementos analizados, para así determinar la estimación sesgada de la varianza (ver Anexo 1.2).

A continuación, se presentan los resultados de R^2 :

- Para la Bomba Centrífuga, se logra determinar que el valor de $R^2=0,96$, lo que evidencia que la recta representa completamente el comportamiento de los datos tratados (ver Gráfico 9).

- Para el Sistema de Transmisión, se logra determinar que el valor de $R^2=0,97$, lo que evidencia que la recta representa completamente el comportamiento de los datos tratados (ver Gráfico 10).
- Para el Ducto Agua Proceso, se logra determinar que el valor de $R^2=0,97$, lo que evidencia que la recta representa completamente el comportamiento de los datos tratados (ver Gráfico 11).

De esta manera, con los datos anteriormente señalados, obtenemos los siguientes parámetros de Weibull (ver Tabla 11).

Parámetros de Weibull			
Componente	Beta	Alfa	MTBF (hr)
Bomba Cent	1,2	2943	2770
Sistema de T	1,68	5469	4883
Ducto Agua	1,3	6819	6296

Tabla 11 Parámetros de Weibull Línea Funcional 1 Etapa 1

6.3.6.2 Validación del Modelo por el Test Kolmogorov-Smirnov.

La comprobación del Modelo de Weibull se realizará a través del Test de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo los parámetros asociados a dicha ley.

Se acepta el modelo cuando:

$$D_{(n,\alpha)} > D_{ni \text{ máximo de tabla}}$$

Para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$

Se utilizará el test de Kolmogorov-Smirnov, para validar el modelo, el cual puede ser aplicado a cualquier número de observaciones y se basa en comparar la verdadera función de distribución con la dada por la ley propuesta.

A continuación, se presenta el desarrollo de tablas para cada uno de estos elementos analizados:

Bomba Centrífuga, ver Tabla 12, se puede observar que su estadístico Dmax es 0,1856

i	Ti	F(i)	F(t)	Dni
1	240	0,056451613	0,148849693	0,09239808
2	840	0,137096774	0,217073496	0,079976721
3	1176	0,217741935	0,262086262	0,044344326
4	1248	0,298387097	0,272318789	0,026068308
5	1488	0,379032258	0,307795358	0,0712369
6	1536	0,459677419	0,315127482	0,144549938
7	2712	0,540322581	0,510686656	0,029635924
8	2832	0,620967742	0,53134195	0,089625792
9	3192	0,701612903	0,592586071	0,109026832
10	3216	0,782258065	0,596606456	0,185651609
11	4392	0,862903226	0,774194414	0,088708812
12	8928	0,943548387	0,996663854	0,053115467

Tabla 12 Tabla de datos K-S Bomba Centrífuga – Línea Funcional 1 Etapa 1

Para el Sistema de Transmisión, ver Tabla 13, se puede apreciar que el estadístico Dmax es 0,1232

i	Ti	F(i)	F(t)	Dni
1	1392	0,109375	0,078052709	0,031322291
2	3168	0,265625	0,259567822	0,006057178
3	3936	0,421875	0,378226274	0,043648726
4	5016	0,578125	0,563676991	0,014448009
5	7104	0,734375	0,857649291	0,123274291
6	7272	0,890625	0,873480145	0,017144855

Tabla 13 Tabla de datos K-S Sist. de Transmisión – Línea Funcional 1 Etapa 1

Para el Ducto Agua Proceso, ver Tabla 14, se puede observar que su estadístico Dmax es 0,1724

i	Ti	F(i)	F(t)	Dni
1	1056	0,083333333	0,120359231	0,037025897
2	2736	0,202380952	0,220978543	0,018597591
3	3168	0,321428571	0,25304775	0,068380821
4	3360	0,44047619	0,268049137	0,172427054
5	7200	0,55952381	0,619965864	0,060442054
6	7968	0,678571429	0,688008811	0,009437383
7	8160	0,797619048	0,704165806	0,093453242
8	13800	0,916666667	0,970868497	0,05420183

Tabla 14 Tabla de datos K-S Ducto Agua Proceso– Línea Funcional 1 Etapa 1

Para determinar los valores críticos, se utilizó la Tabla 15.

	α				
n	0.001	0.01	0.02	0.05	0.1
1		0.99500	0.99000	0.97500	0.95000
2	0.97764	0.92930	0.90000	0.84189	0.77639
3	0.92063	0.82900	0.78456	0.70760	0.63604
4	0.85046	0.73421	0.68887	0.62394	0.56522
5	0.78137	0.66855	0.62718	0.56327	0.50945
6	0.72479	0.61660	0.57741	0.51926	0.46799
7	0.67930	0.57580	0.53844	0.48343	0.43607
8	0.64098	0.54180	0.50654	0.45427	0.40962
9	0.60846	0.51330	0.47960	0.43001	0.38746
10	0.58042	0.48895	0.45662	0.40962	0.36866
11	0.55588	0.46770	0.43670	0.39122	0.35242
12	0.53422	0.44905	0.41918	0.37543	0.33815
13	0.51490	0.43246	0.40362	0.36143	0.32548
14	0.49753	0.41760	0.38970	0.34890	0.31417
15	0.48182	0.40420	0.37713	0.33760	0.30397
16	0.46750	0.39200	0.36571	0.32733	0.29471
17	0.45440	0.38085	0.35528	0.31796	0.28627
18	0.44234	0.37063	0.34569	0.30936	0.27851
19	0.43119	0.36116	0.33685	0.30142	0.27135
20	0.42085	0.35240	0.32866	0.29407	0.26473
25	0.37843	0.31656	0.30349	0.26404	0.23767
30	0.34672	0.28988	0.27704	0.24170	0.21756
35	0.32187	0.26898	0.25649	0.22424	0.20184
40	0.30169	0.25188	0.23993	0.21017	0.18939
45	0.28482	0.23780	0.22621	0.19842	0.17881
50	0.27051	0.22585	0.21460	0.18845	0.16982
Over 50	1.94947/ $\sqrt{n}$	1.62762/ $\sqrt{n}$	1.51743/ $\sqrt{n}$	1.35810/ $\sqrt{n}$	1.22385/ $\sqrt{n}$

Tabla 15 Tabla de K-S

Con la tabla anterior, se obtuvieron los siguientes resultados, con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0,05$):

- Bomba Centrífuga, $D(12; 0,05) = 0,375$
- Sistema de Transmisión, según lo siguiente $D(6; 0,05) = 0,519$
- Ducto Agua Proceso, según lo siguiente $D(8; 0,05) = 0,454$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al aplicar y validar por comparación con el método de Kolmogorov-Smirnov, con una confiabilidad del 95% los datos obtenidos anteriormente en las distintas tablas según cada elemento analizado, en comparación con los datos entregados en tabla de Kolmogorov-Smirnov:

- Para la Bomba Centrífuga, según lo siguiente $D(12; 0,05) = 0,375 > Dni_{max}(0,1856)$, no se rechaza la hipótesis.
- Para el Sistema de Transmisión, según lo siguiente $D(6; 0,05) = 0,519 > Dni_{max}(0,1232)$, no se rechaza la hipótesis.
- Para el Ducto Agua Proceso, según lo siguiente $D(8; 0,05) = 0,454 > Dni_{max}(0,1724)$, no se rechaza la hipótesis.

6.3.6.3 Curva de Confiabilidad

A continuación, se presenta la curva de confiabilidad obtenida de los elementos en estudio. (ver Gráfico 7).

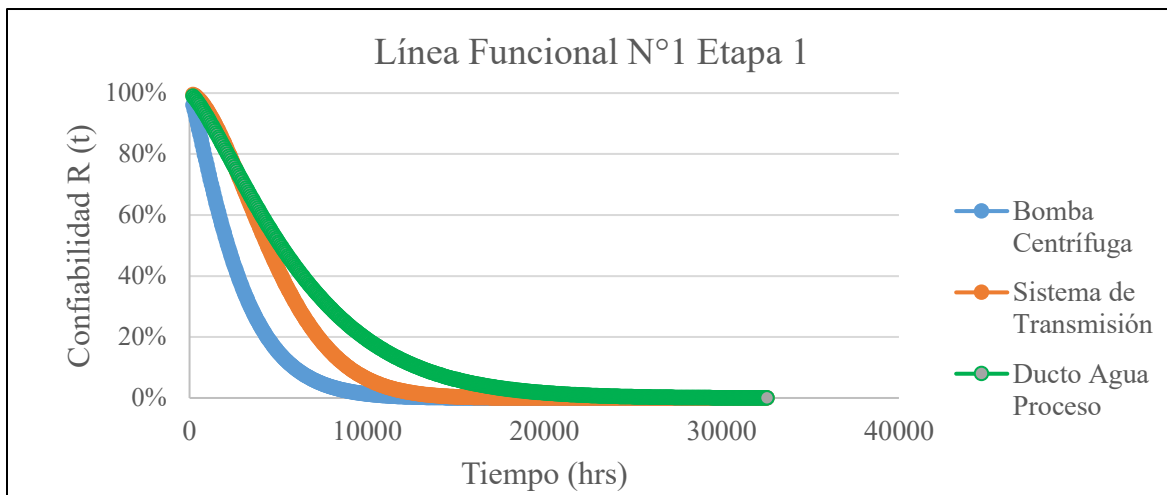


Gráfico 7 Curva Confiabilidad Equipos y Componentes Línea Funcional 1 Etapa 1

Del gráfico anterior, podemos determinar lo siguiente:

- En el caso de la Bomba Centrífuga, según el gráfico anterior, para un *MTBF* de 2800 horas tiene una confiabilidad de un 40% y si se evalúa para 2200 horas, la confiabilidad alcanza un 50%.

- Para el Sistema de Transmisión, del gráfico anterior, podemos determinar que para un *MTBF* de 4880 horas tiene una confiabilidad de un 44% y si se evalúa para 4350 horas, la confiabilidad alcanza un 50%.
- En el caso del Ducto Agua Proceso, por el gráfico anterior, podemos determinar que para un *MTBF* de 6300 horas tiene una confiabilidad de un 40% y si se evalúa para 4300 horas, la confiabilidad alcanza un 57%.

6.3.6.4 Tasa de Falla

En el siguiente gráfico (ver Gráfico 8), se logra observar la curva de la tasa de falla de los elementos críticos que componen la línea funcional.

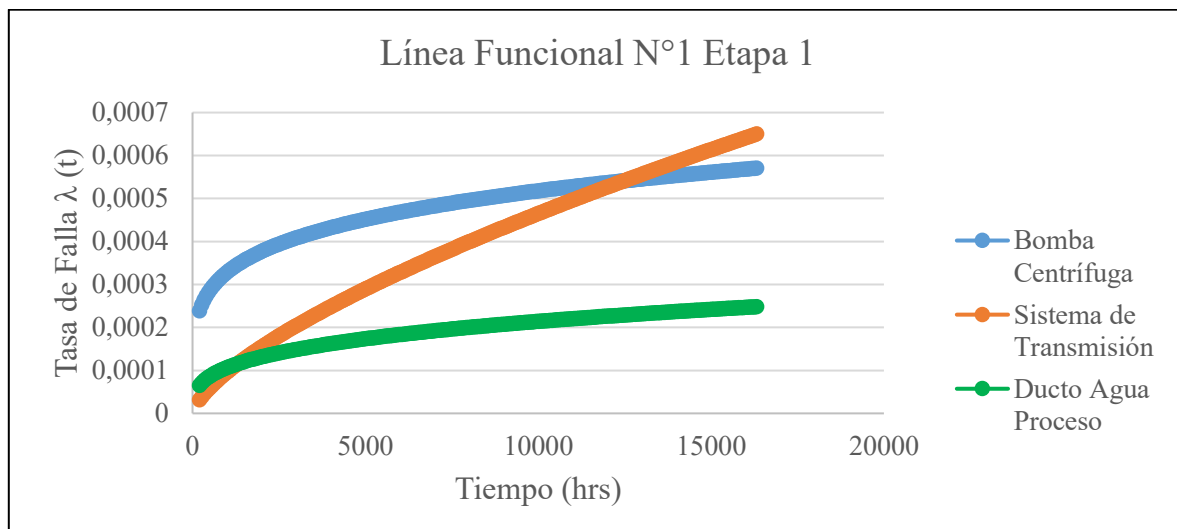


Gráfico 8 Curva Tasa de Falla Equipos y Componentes Línea Funcional 1 Etapa 1

Del gráfico anterior, podemos determinar lo siguiente:

- En la Bomba centrífuga, según la gráfica, para un $\beta = 1,2$, podría indicar que el componente llega a la falla producto del desgaste propio de este.

- Para el caso del Sistema de Transmisión, del gráfico anterior, podemos determinar que para un $\beta = 1,68$, podría indicar que el componente llega a la falla producto del desgaste propio de este.
- En lo que es Ducto Agua Proceso, al observar la gráfica anterior, podemos determinar que para un $\beta = 1,3$, podría indicar que el componente llega a la falla producto del desgaste propio de este.

7. Resultados

A partir del desarrollo metodológico aplicado en el área de Flotación, se logró identificar los equipos y componentes críticos mediante análisis de criticidad, evaluación económica y modelamiento estadístico de fallas.

Los resultados obtenidos permitieron establecer una propuesta de política de mantenimiento basada en confiabilidad, orientada a minimizar el costo global de mantenimiento y reducir el impacto operacional de las fallas.

7.1. Resultados de criticidad

- El análisis de Pareto permitió identificar que aproximadamente el 80% del costo global de mantenimiento se concentra en cuatro modos de falla principales.
 - Desgaste de componentes húmedos de bomba centrífuga.
 - Falla de elementos del sistema de transmisión por poleas.
 - Rotura por pérdida de espesor en ducto de descarga y recirculación.
 - Falla de rodamientos en caja porta rodamientos.
- El análisis Jack Knife determinó como modos de falla críticos aquellos ubicados en el cuadrante C (crónicos y agudos), correspondientes principalmente a:
 - Desgaste de componentes húmedos de bomba centrífuga.
 - Falla de elementos del sistema de transmisión por poleas.
 - Rotura por pérdida de espesor Ducto Agua Proceso.

7.2. Resultados del análisis de confiabilidad.

- Para la bomba centrífuga se obtuvo:
 $\beta = 1,2$
Lo que indica falla asociada a desgaste progresivo.
Justifica estudiar una política por edad.

- Para el sistema de transmisión se obtuvo:
 $\beta = 1,68$
 Lo que indica envejecimiento y deterioro funcional.
 Justifica estudiar una política por edad.
- Para el ducto agua proceso se obtuvo:
 $\beta = 1,3$
 Confirmando deterioro por desgaste operacional.
 Justifica estudiar una política por edad.

En los resultados anteriores, con un $\beta > 1$, significa que el equipo o componente está envejeciendo y que la probabilidad de falla aumenta a medida que acumula horas de operación.

Es decir:

- Se afecta el comportamiento del activo producto del desgaste.
- Aumento de la probabilidad de falla a medida que aumenta el tiempo de operación.
- Justifica estudiar una política por edad

7.3. Evaluación de la política de mantenimiento basada en uso

A partir de los resultados obtenidos en el punto 7.2, se evalúa la conveniencia de aplicar una política de mantenimiento preventivo a edad constante para los componentes críticos seleccionados. La evaluación integra el comportamiento de confiabilidad estimado mediante Weibull con el costo global de las intervenciones preventivas y correctivas.

El modelo permite analizar si existe una edad de sustitución que minimice el costo esperado por unidad de tiempo. Sin embargo, la existencia de un mínimo económico no implica, por sí sola, que dicha edad constituya una frecuencia preventiva técnicamente recomendable, ya que también debe considerarse la confiabilidad $R(t)$ y la probabilidad acumulada de falla $F(t)$ asociadas a ese punto.

Por lo tanto, los resultados económicos se interpretan como criterios de apoyo para la decisión y deben contrastarse con el riesgo operacional y con la factibilidad de utilizar información de condición para anticipar el deterioro.

Bajo este enfoque, el estudio no busca imponer una política preventiva por edad constante para todos los componentes, sino determinar en qué casos esta alternativa resulta justificable y en cuáles sus limitaciones hacen recomendable una estrategia basada en condición o una política diferenciada.

7.3.1 Modelo mantención preventiva a edad constante.

Este modelo se basa en que el componente se sustituirá cuando alcance una determina edad o tiempo de uso. El periodo de sustitución, transcurrirá desde la última intervención, sea esta preventiva o correctiva [1].

7.4. Resultado económico Política de Mantenimiento Propuesta.

7.4.1 Resultado Bomba Centrífuga

El análisis mediante distribución de Weibull arrojó un parámetro $\beta = 1,2$, lo que indica una tasa de falla levemente creciente. Esto evidencia un comportamiento cercano a fallas aleatorias, pero con tendencia incipiente al desgaste.

Al incorporar los costos de intervención preventiva y correctiva (ver Anexo 1.3) en el modelo de mantenimiento preventivo a edad constante, el CTM disminuye progresivamente al incrementar la edad de intervención y converge hacia un valor límite, sin presentar un mínimo inferior seguido de un incremento del costo. En consecuencia, para los parámetros de confiabilidad y costos considerados, no se identifica una edad finita óptima de sustitución preventiva.

Bomba Centrífuga							
t (h)	R(t)	1-R(t)	Cp·R(t)	Ce·(1-R(t))	Área Trapecio	MTBFtp	CTM (USD/hr)
0	1	0	14240	0	0	0	
1000	0,760463524	0,239536476	10829,00058	4736,115208	880,2317619	880,2317619	17,68297449
1700	0,595934255	0,404065745	8486,103793	7989,187908	474,7392226	1354,970985	12,15914724
2200	0,493952494	0,506047506	7033,883511	10005,57129	272,4716872	1627,442672	10,4700799
2700	0,405836164	0,594163836	5779,106971	11747,80737	224,9471643	1852,389836	9,461784988
3200	0,330962986	0,669037014	4712,912914	13228,19985	184,1997873	2036,589623	8,809390246
3700	0,268155062	0,731844938	3818,528077	14470,03812	149,7795118	2186,369135	8,364811735
4200	0,21601395	0,78398605	3076,038651	15500,97218	121,042253	2307,411388	8,05101809
4700	0,173105179	0,826894821	2465,017754	16349,36439	97,27978239	2404,691171	7,824032615
5200	0,138059607	0,861940393	1965,9688	17042,28546	77,79119651	2482,482367	7,656954389
5700	0,109625842	0,890374158	1561,071988	17604,47786	61,92136214	2544,403729	7,532432697
6200	0,086693112	0,913306888	1234,509921	18057,90378	49,07973857	2593,483468	7,438803425
6700	0,068296316	0,931703684	972,5395451	18421,64523	38,74735721	2632,230825	7,367965071
7200	0,053610638	0,946389362	763,4154868	18712,01046	30,47673862	2662,707564	7,314143775
7700	0,041940446	0,958059554	597,2319531	18942,7535	23,88777107	2686,595335	7,273140543
8200	0,032705482	0,967294518	465,7260574	19125,34722	18,66148193	2705,256817	7,2418534
8700	0,025426233	0,974573767	362,0695521	19269,27253	14,53292854	2719,789745	7,217963123
9200	0,019709647	0,980290353	280,6653673	19382,30087	11,28396979	2731,073715	7,199720069
9700	0,015235838	0,984764162	216,9583366	19470,75701	8,736371206	2739,810086	7,18579563
10200	0,011746128	0,988253872	167,2648657	19539,75555	6,745491613	2746,555578	7,175176275
10700	0,009032536	0,990967464	128,6233137	19593,4087	5,194666071	2751,750244	7,167086495
11200	0,006928722	0,993071278	98,66499459	19635,00532	3,990314402	2755,740558	7,160931842
11700	0,005302289	0,994697711	75,50459816	19667,16314	3,057752682	2758,798311	7,15625628

Tabla 16 Resultado Económico Política de Mantenimiento Bomba Centrífuga.

7.4.2 Resultado Sistema de Transmisión

Para el sistema de transmisión, el análisis Weibull arrojó un parámetro $\beta = 1,68$, lo que evidencia una tasa de falla creciente y un comportamiento asociado al desgaste. Al aplicar el modelo de mantenimiento preventivo a edad constante, se observa que el costo esperado por unidad de tiempo disminuye hasta alcanzar un mínimo aproximado de 1,4789392 a las 5700 horas posteriormente, el CTM comienza a aumentar, indicando que extender la operación más allá de este punto incrementa el costo esperado por el efecto del mayor riesgo de falla.

El valor de 5.700 horas corresponde al mínimo económico matemático del modelo para el sistema de transmisión (ver Tabla 17). No obstante, a esa edad la confiabilidad estimada es $R(t) = 34,23 \%$ y la probabilidad acumulada de falla es $F(t) = 65,77 \%$. Por esta razón, el resultado no debe interpretarse directamente como una frecuencia preventiva recomendada, ya que una proporción importante de las fallas podría ocurrir antes de alcanzar dicha edad.

Sistema de Transmisión							
t (h)	R(t)	1-R(t)	Cp·R(t)	Ce·(1-R(t))	Área Trapecio	MTBFtp	CTM (USD/hr)
0	1	0	2900	0	0	0	
100	0,998797676	0,001202324	2896,513261	9,02945205	99,93988381	99,93988381	29,07290465
500	0,982190327	0,017809673	2848,351948	133,7506451	396,1976006	496,1374844	6,010637549
900	0,952904767	0,047095233	2763,423825	353,6851974	387,0190188	883,1565033	3,529509222
1300	0,914410033	0,085589967	2651,789096	642,7806507	373,4629601	1256,619463	2,621772019
1700	0,868990965	0,131009035	2520,073797	983,8778558	356,6801996	1613,299663	2,171916187
2100	0,818511542	0,181488458	2373,683471	1362,978322	337,5005013	1950,800164	1,91545083
2500	0,764583273	0,235416727	2217,291491	1767,979621	316,6189629	2267,419127	1,757624369
2900	0,708618345	0,291381655	2054,993201	2188,276227	294,6403236	2562,059451	1,656194757
3300	0,651848464	0,348151536	1890,360546	2614,618034	272,0933619	2834,152813	1,589532703
3700	0,595332803	0,404667197	1726,465129	3039,050648	249,4362535	3083,589066	1,545444505
4100	0,53996351	0,46003649	1565,89418	3454,874038	227,0592627	3310,648329	1,516551358
4500	0,486472047	0,513527953	1410,768937	3856,594926	205,2871115	3515,93544	1,498140097
4900	0,435437523	0,564562477	1262,768816	4239,864205	184,3819139	3700,317354	1,487070566
5300	0,387297211	0,612702789	1123,161911	4601,397948	164,5469467	3864,864301	1,48118004
5700	0,342358977	0,657641023	992,8410321	4938,884086	145,9312374	4010,795538	1,478939792
6100	0,300815131	0,699184869	872,3638796	5250,878367	128,6348215	4139,43036	1,479247557
6500	0,262757146	0,737242854	761,9957233	5536,693834	112,7144554	4252,144815	1,481297047
6900	0,228190683	0,771809317	661,7529807	5796,287971	98,18956579	4350,334381	1,484493003
7300	0,197050422	0,802949578	571,4462252	6030,151327	85,04822109	4435,382602	1,488394158

Tabla 17 Resultado Económico Política de Mantenimiento sistema de transmisión

7.4.3 Resultado Ducto Agua Proceso.

El análisis de confiabilidad del ducto de agua de proceso mediante la distribución de Weibull arrojó un parámetro de forma $\beta = 1,30$, indicando un comportamiento caracterizado por una tasa de falla creciente asociada a un proceso de desgaste moderado, el parámetro de escala $\alpha = 6818,28$ horas evidencia una vida característica elevada del componente.

Al integrar la función de confiabilidad con el modelo de mantenimiento preventivo a edad constante, se determinó que el costo esperado por unidad de tiempo alcanza un valor mínimo aproximado de 0,601284685 USD/h en torno a las 10.800 horas (ver Tabla 18).

Las 10.800 horas representan el mínimo económico matemático del modelo. Sin embargo, a esa edad la confiabilidad estimada es $R(t) = 16,23 \%$ y la probabilidad acumulada de falla $F(t) = 83,77 \%$. En consecuencia, este valor no resulta apropiado para ser utilizado de manera directa como una frecuencia fija de sustitución preventiva. Dado que el modo de falla dominante está asociado a pérdida de espesor, el resultado económico debe complementarse preferentemente con inspecciones de condición y seguimiento del desgaste.

Ducto Agua Proceso							
t (h)	R(t)	1-R(t)	Cp·R(t)	Ce·(1-R(t))	Área Trapecio	MTBFtp	CTM (USD/hr)
0	1	0	1060	0	0	0	
1000	0,92086635	0,07913365	976,1183306	302,7653464	960,4331748	960,4331748	1,331569661
1700	0,848459844	0,151540156	899,3674348	579,7926361	619,2641678	1579,697343	0,936356624
2400	0,773147804	0,226852196	819,5366727	867,9365003	567,562677	2147,26002	0,785872767
3100	0,698480748	0,301519252	740,3895926	1153,612659	515,0699933	2662,330013	0,711407768
3800	0,626514805	0,373485195	664,1056933	1428,954356	463,7484435	3126,078456	0,669548151
4500	0,558485193	0,441514807	591,994305	1689,23565	414,7499994	3540,828456	0,644264466
5200	0,495106643	0,504893357	524,8130411	1931,721986	368,7571426	3909,585598	0,628336422
5900	0,436741321	0,563258679	462,9458006	2155,027705	326,1467873	4235,732386	0,618068675
6600	0,383505809	0,616494191	406,5161578	2358,706774	287,0864957	4522,818881	0,611393691
7300	0,335344781	0,664655219	355,4654674	2542,97087	251,5977064	4774,416588	0,607076547
8000	0,292084152	0,707915848	309,6092011	2708,486034	219,6001264	4994,016714	0,604342238
8700	0,253470407	0,746529593	268,6786309	2856,222225	190,9440955	5184,96081	0,602685530
9400	0,219200032	0,780799968	232,3520339	2987,340678	165,4346535	5350,395463	0,601767240
10100	0,188941599	0,811058401	200,2780951	3103,109442	142,8495709	5493,245034	0,601354485
10800	0,162352218	0,837647782	172,0933507	3204,840415	122,9528359	5616,19787	0,601284685
11500	0,139089632	0,860910368	147,4350101	3293,843067	105,5046474	5721,702517	0,601443026
12200	0,118820919	0,881179081	125,9501738	3371,391165	90,26869281	5811,97121	0,601747877
12900	0,101228521	0,898771479	107,3022326	3438,699677	77,017304	5888,988514	0,602141081
13600	0,086014222	0,913985778	91,17507572	3496,909585	65,53496029	5954,523474	0,602581328

Tabla 18 Resultado Económico Política de Mantenimiento Ducto Agua Proceso

7.5 Lineamientos para una política de mantenimiento diferenciada

Los resultados obtenidos muestran que una política preventiva uniforme a edad constante no resulta igualmente conveniente para los tres componentes analizados. Por ello, se propone utilizar los resultados Weibull y económicos como información de apoyo para definir una estrategia diferenciada según el comportamiento de falla, la confiabilidad asociada y la posibilidad de observar el deterioro mediante técnicas de condición.

Para la bomba centrífuga, el modelo no identifica una edad finita económicamente óptima de sustitución preventiva. Para el sistema de transmisión y el ducto de agua de proceso se identifican mínimos económicos a 5.700 y 10.800 horas, respectivamente; sin embargo, las probabilidades acumuladas de falla asociadas a dichas edades son elevadas, por lo que estos valores se consideran referencias económicas y no intervalos preventivos de aplicación automática.

En consecuencia, la implementación debe priorizar el seguimiento del comportamiento real de los activos, la actualización de los parámetros con nuevos datos y, cuando sea técnicamente factible, el uso de información de condición para anticipar el deterioro.

La Tabla 19 resume los lineamientos propuestos para cada componente a partir de los resultados del estudio:

Criterio	Bomba centrífuga	Sistema de transmisión	Ducto agua proceso
Elemento controlado	Componentes húmedos	Elementos del sistema de transmisión por poleas	Tramo de ducto asociado al modo de falla
Resultado económico	Sin edad finita óptima	Mínimo CTM a 5.700 h	Mínimo CTM a 10.800 h
Interpretación	UBM a edad constante no justificada económicamente	Referencia económica; no frecuencia preventiva automática	Referencia económica; no frecuencia preventiva automática
Confiabilidad en referencia	-	34,23 %	16,23 %
Probabilidad de falla	-	65,77 %	83,77 %
Enfoque sugerido	Seguimiento operacional y evaluación por condición cuando corresponda	Seguimiento de condición, historial y revisión del modelo	Inspección de espesor/condición y seguimiento del desgaste
Registro	Horas, fallas e intervenciones	Horas, fallas e intervenciones	Horas, fallas, inspecciones e intervenciones
Reinicio de edad	Solo sustitución o intervención equivalente a “como nuevo”	Solo sustitución o intervención equivalente a “como nuevo”	Reemplazo del tramo o intervención equivalente a “como nuevo”; no por reparación temporal
Revisión del modelo	Con nuevos datos	Con nuevos datos	Con nuevos datos y mediciones de condición

Tabla 19 Criterios operacionales equipos analizados.

7.5.1 Registro de horas y eventos

Para cada componente se recomienda mantener un registro de horas efectivas de operación y de los eventos de intervención, diferenciando sustituciones, reparaciones y fallas. Este registro permitirá actualizar las edades de falla y verificar si el comportamiento observado continúa siendo representado adecuadamente por el modelo Weibull.

El reinicio de la edad del componente debe aplicarse únicamente cuando exista sustitución o una intervención equivalente a una condición “como nuevo”. En el caso del ducto, una reparación temporal no debe considerarse equivalente al reemplazo del tramo y, por tanto, no corresponde reiniciar automáticamente su edad.

7.5.2 Interpretación de las edades económicas

Las edades de 5.700 horas para el sistema de transmisión y 10.800 horas para el ducto de agua de proceso corresponden a mínimos del CTM bajo los supuestos del modelo. Debido a las bajas

confiabilidades asociadas, no se recomienda tratarlas como intervalos rígidos de sustitución preventiva.

Estos valores deben utilizarse como referencias económicas para comparar alternativas de mantenimiento y para orientar revisiones del comportamiento del activo, evitando concluir que operar hasta dichas edades garantiza una condición técnicamente aceptable.

7.5.3 Seguimiento de condición y planificación

En los componentes donde el deterioro pueda ser observado mediante inspecciones o técnicas predictivas, se recomienda complementar el análisis por edad con información de condición. En particular, para el ducto de agua de proceso, el seguimiento de pérdida de espesor permite relacionar el mecanismo físico de desgaste con la decisión de intervención.

Para el sistema de transmisión, la planificación debe considerar inspecciones y antecedentes operacionales que permitan detectar señales de deterioro antes de alcanzar la referencia económica de 5.700 horas, especialmente considerando la probabilidad de falla acumulada estimada a esa edad.

7.5.4 Repuestos y coordinación operacional

La gestión de repuestos debe mantenerse alineada con la criticidad de los modos de falla identificados: componentes húmedos de la bomba centrífuga, elementos requeridos del sistema de transmisión y tramos o elementos asociados al ducto de agua de proceso.

Los tiempos históricos de intervención pueden utilizarse como referencia para la planificación de recursos y coordinación con Operaciones, sin asociarlos necesariamente a una sustitución preventiva por edad fija.

Cuando la información de condición, el historial reciente o una evaluación técnica indiquen deterioro significativo, la intervención podrá coordinarse con una parada programada disponible, considerando conjuntamente riesgo, continuidad operacional y costo.

7.5.5 Tratamiento de nuevos eventos

Toda falla o intervención deberá incorporarse al historial indicando la edad efectiva alcanzada y el tipo de intervención realizada. Esta información es necesaria para aumentar la representatividad de la muestra y reducir la incertidumbre de futuras estimaciones.

Los nuevos antecedentes permitirán reestimar los parámetros Weibull, contrastar los resultados económicos y evaluar si las conclusiones obtenidas en este estudio se mantienen en el tiempo.

7.5.6 Indicadores de seguimiento

Para verificar la evolución de la estrategia se propone controlar, como mínimo, horas de operación entre eventos, número de fallas, MTBF, MTTR, disponibilidad, intervenciones por condición y comportamiento de los costos preventivos y correctivos.

Estos indicadores permitirán evaluar la efectividad de la política diferenciada y determinar si existen antecedentes suficientes para modificar las referencias económicas o establecer nuevos criterios de intervención.

7.5.7 Revisión de los parámetros

Los parámetros Weibull y los mínimos económicos obtenidos deben considerarse valores de referencia sujetos a actualización. Se recomienda revisar el modelo cuando se disponga de nuevos eventos de falla o existan cambios relevantes en las condiciones operacionales, estrategia de mantenimiento, materiales, diseño del componente o condiciones del proceso.

7.6 Resultado general del estudio

El estudio permitió aplicar un modelo de confiabilidad basado en la distribución de Weibull, integrado con un modelo económico de mantenimiento preventivo a edad constante.

Los resultados muestran que los tres activos analizados presentan valores de β mayores que 1, lo que podría indicar una tasa de falla creciente y, por lo tanto, un comportamiento asociado a desgaste o deterioro progresivo.

En términos generales, los resultados no permiten recomendar una política preventiva uniforme a edad constante para los tres activos. En la bomba centrífuga no se identifica una edad finita económicamente óptima; en el sistema de transmisión y el ducto de agua de proceso aparecen mínimos económicos, pero asociados a probabilidades acumuladas de falla elevadas, lo que limita su utilización directa como frecuencias preventivas.

En el sistema de transmisión, el mínimo económico se obtiene a 5.700 horas. Sin embargo, la confiabilidad estimada en ese punto es 34,23 %, por lo que el valor debe interpretarse como una referencia económica y no como un intervalo preventivo recomendado.

En el ducto de agua de proceso, el mínimo económico se obtiene a 10.800 horas, con una confiabilidad estimada de 16,23 %. Considerando además que el modo de falla está asociado a pérdida de espesor, resulta técnicamente más consistente complementar la decisión con inspecciones de condición y seguimiento del desgaste.

8. Conclusiones

El desarrollo de la investigación permitió cumplir el objetivo general de proponer una política de mantenimiento basada en confiabilidad para equipos críticos del área de Flotación, sustentada en el análisis de criticidad, el modelamiento estadístico de fallas y la evaluación económica de las intervenciones.

La evidencia obtenida orienta hacia una política diferenciada: utilizar la información de confiabilidad y costos como apoyo a la decisión, mantener el seguimiento de los activos y fortalecer, cuando sea factible, el mantenimiento basado en condición para los mecanismos de deterioro observables.

El análisis efectuado permitió establecer que no todos los modos de falla generan el mismo efecto sobre la continuidad operacional ni sobre el costo del negocio. La aplicación conjunta del costo global de mantenimiento, el análisis de Pareto y la metodología Jack Knife permitió focalizar la atención en aquellos modos de falla de mayor incidencia técnica y económica.

En particular, el desgaste de componentes húmedos de la bomba centrífuga, la falla de elementos del sistema de transmisión por poleas y la rotura por pérdida de espesor del ducto agua proceso fueron identificados como los eventos más relevantes de la línea funcional analizada, por cuanto combinan alta frecuencia de intervención, tiempos fuera de servicio significativos e impacto económico sobre la producción.

El uso de la distribución de Weibull resultó adecuado para representar el comportamiento de falla de los elementos críticos seleccionados. La validación realizada mediante el test de Kolmogorov-Smirnov permitió no rechazar la hipótesis de ajuste para la bomba centrífuga, el sistema de transmisión y el ducto agua proceso.

Este resultado es relevante, ya que entrega una base cuantitativa para sustentar la toma de decisiones de mantenimiento a partir de la probabilidad de falla, la confiabilidad remanente y la evolución de la tasa de falla en el tiempo.

8.1 Síntesis cuantitativa de los componentes modelados mediante Weibull

Con el propósito de sintetizar los resultados que sustentan la evaluación de la política de mantenimiento, la Tabla 20 presenta, para los tres componentes sometidos a modelamiento Weibull, el mínimo económico obtenido cuando corresponde, la confiabilidad y probabilidad de falla asociadas a dicho punto, junto con el costo esperado mínimo por unidad de tiempo.

Componente	Mínimo económico / edad de referencia (hr)	Confiabilidad R(t)	Probabilidad de falla F(t)	CTM mínimo (USD/hr)
Bomba centrífuga	-	-	-	-
Sistema de transmisión	5.700	34,23 %	65,77 %	1.4789392
Ducto agua proceso	10.800	16,23 %	83,77 %	0.601284685

Tabla 20 indicadores de Confiabilidad de Equipos analizados

Los resultados muestran que el mínimo económico no corresponde a un umbral único ni necesariamente aceptable de confiabilidad. En el sistema de transmisión y el ducto de agua de proceso los mínimos se ubican en 5.700 horas y 10.800 horas, respectivamente, con confiabilidad de 34,23 % y 16,23 %. Por ello, estos puntos deben interpretarse como resultados matemáticos del modelo económico y no, por sí solos, como edades recomendadas de sustitución preventiva.

8.2 Supuestos y limitaciones asociados a los resultados

- Bomba centrífuga.

Con los resultados obtenidos en el caso de la bomba, con los costos y parámetros Weibull utilizados, el modelo no identifica una edad finita económicamente óptima para el reemplazo preventivo de los componentes húmedos de la bomba centrífuga. Dentro de los supuestos del modelo, prolongar la operación reduce el CTM hasta aproximarse al costo de una política de operación hasta la falla.

Lo anterior, no significa que se recomiende un mantenimiento correctivo puro, ya que deben considerarse seguridad, impacto operacional, consecuencias de falla y posibilidades de mantenimiento basado en condición.

Sin embargo, se establece que el reemplazo preventivo por edad constante no queda económicamente justificado por este modelo.

- Sistema de transmisión.

El mínimo económico de 5.700 horas supone que el patrón de desgaste representado por la distribución Weibull y la relación entre los costos preventivos y de emergencia permanecen estables. La confiabilidad asociada de 34,23 % y la probabilidad de falla de 65,77 % muestran que una fracción importante de los eventos podría ocurrir antes de dicha edad. Por ello, este punto constituye una referencia económica y no una frecuencia preventiva recomendada. Su principal limitación corresponde al tamaño de la muestra histórica disponible, por lo que el resultado debe revisarse al incorporar nuevos eventos y horas de operación.

- Ducto de agua de proceso.

El mínimo económico de 10.800 horas se obtiene bajo el supuesto de que el mecanismo dominante continúa siendo la pérdida de espesor por desgaste y que los costos considerados representan adecuadamente las consecuencias de una intervención preventiva y una falla imprevista. A dicha edad se obtiene una confiabilidad de 16,23 % y una probabilidad de falla de 83,77 %, por lo que no resulta recomendable utilizarla directamente como frecuencia fija de sustitución. El modelo no incorpora explícitamente información de condición en línea ni cambios futuros en variables de proceso; en consecuencia, el resultado debe complementarse con inspecciones de espesor y seguimiento del deterioro.

De manera transversal, los parámetros Weibull fueron estimados utilizando las mismas muestras empleadas posteriormente en la evaluación del ajuste mediante Kolmogorov-Smirnov. Por ello, la comparación con una tabla K-S convencional debe interpretarse como un indicador de bondad de ajuste y no como una validación estadística independiente definitiva. Asimismo, los resultados dependen de la calidad y representatividad de los registros históricos del ERP y de los supuestos económicos adoptados en el estudio.

El alcance final de la investigación se concentra en la identificación de componentes críticos, su modelamiento de confiabilidad y la evaluación técnico-económica de una política preventiva basada en uso. En consecuencia, no se cuantifican como resultados finales el ahorro anual proyectado ni la disponibilidad proyectada, indicadores que quedan fuera de los objetivos específicos vigentes del estudio.

La incorporación de variables económicas permitió proponer que la decisión de mantenimiento no debe sustentarse solamente en la ocurrencia de la falla, sino también en la magnitud de sus consecuencias sobre el negocio. El costo de falla asociado a pérdida de producción, sumado al costo de intervención, mostró que ciertos modos de falla generan un efecto económico desproporcionado respecto de otros eventos menos críticos. Por ello, la evaluación del costo global de mantenimiento constituyó un elemento central para priorizar activos y para definir el punto de intervención más conveniente desde la perspectiva de la gestión de activos.

A partir de los resultados anteriores, se concluye que no existe evidencia suficiente para recomendar una política preventiva pura a edad constante para todos los componentes analizados. La alternativa más consistente con los resultados es una política diferenciada, en la que la confiabilidad y el análisis económico actúen como herramientas de apoyo y se complementen con información de condición cuando el mecanismo de deterioro pueda ser observado.

En consecuencia, la propuesta desarrollada no redefine la estrategia global de mantenimiento de planta ni establece frecuencias preventivas rígidas, sino que entrega criterios técnicos y económicos para apoyar la decisión de intervención de los activos críticos dentro del contexto operativo actual.

Los resultados también muestran que el mantenimiento basado en condición constituye una alternativa relevante para complementar la gestión de los componentes estudiados, particularmente cuando existe un mecanismo de deterioro observable, como la pérdida de espesor del ducto de agua de proceso.

La disponibilidad actual de seguimiento predictivo puede utilizarse como base para fortalecer progresivamente este enfoque, mientras que la información histórica de fallas y costos permite mantener y actualizar los modelos de confiabilidad y evaluación económica.

Bajo este escenario, la propuesta formulada puede implementarse inicialmente como un esquema de seguimiento y revisión periódica de los componentes críticos, evitando adoptar los mínimos económicos calculados como frecuencias automáticas de reemplazo.

Por otra parte, los resultados evidencian que, aunque los tres activos presentan parámetros β mayores que 1, la decisión de mantenimiento no depende únicamente del comportamiento Weibull ni del

mínimo del CTM. También debe considerar la confiabilidad y probabilidad de falla asociadas, las consecuencias operacionales y la posibilidad de detectar el deterioro antes de la falla.

En consecuencia, la metodología empleada permite identificar tanto oportunidades como limitaciones de una política preventiva basada en uso. En este caso, los resultados justifican mantener una evaluación diferenciada por componente y fortalecer el seguimiento de condición antes de establecer frecuencias preventivas definitivas.

En términos generales, el estudio demuestra que la integración del análisis de confiabilidad con modelos de costos constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones en gestión de activos, siempre que los mínimos económicos sean interpretados junto con el nivel de confiabilidad y las limitaciones de los datos disponibles.

Dado lo anterior, la metodología propuesta puede favorecer una gestión de mantenimiento orientada a mejorar la disponibilidad, optimizar el uso de recursos y reducir la exposición a fallas imprevistas, mediante decisiones sustentadas en evidencia y actualizadas con la experiencia operacional.

Bibliografía

- [1] Arata, A. (2005). *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento*.
- [2] Arata, A. (2008). *Determinación de equipos críticos en una planta de Chancado a través de la plataforma R-MES*, Conferencia Latinoamericana de Gestión de Mantenimiento y Confiabilidad Operacional.
- [3] Crespo, A. (2013). *Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo*. Departamento de Industrias. Universidad Técnica Federico Santa María.
- [4] IEC 60050-191:1990. (1990). *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 191: Dependability and quality of service*.
- [5] Mora, A. (2009). *Mantenimiento, Planeación, Ejecución y Control*.
- [6] Pascual, R. (2005). *El Arte de Mantener*, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [7] Parra, C. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*.
- [8] Pistarelli, A. (2013). *Manual de Mantenimiento, Ingeniería, Gestión y Organización*.
- [9] Stegmaier, R. (2012). *Presentación, Desarrollo de la Ingeniería de Mantenimiento*.
- [10] UNE-EN 15341:2008. (2008). *Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento*. Normalización Española.

Anexos

ANEXO 1.1: Regresión Línea Funcional 1 Etapa 1

N° de Falla	Tiempo de Falla (hr)	Rangos Medianos	ln (t)	$\ln(\ln(1/(1-F(i))))$
i	ti	F(i)	xi	yi
1	240	0,056451613	5,48	-2,845458285
2	840	0,137096774	6,73	-1,914247621
3	1176	0,217741935	7,07	-1,404170849
4	1248	0,298387097	7,13	-1,037403987
5	1488	0,379032258	7,31	-0,741337623
6	1536	0,459677419	7,34	-0,485175833
7	2712	0,540322581	7,91	-0,252018579
8	2832	0,620967742	7,95	-0,03032111
9	3192	0,701612903	8,07	0,190094315
10	3216	0,782258065	8,08	0,421630212
11	4392	0,862903226	8,39	0,686660297
12	8928	0,943548387	9,1	1,055834013

Tabla 21 Tabla de Regresión Lineal Bomba Centrífuga Línea Funcional 1 Etapa 1

N° de Falla	Tiempo de Falla (hr)	Rangos Medianos	ln (t)	$\ln(\ln(1/(1-F(i))))$
i	ti	F(i)	xi	yi
1	1392	0,109375	7,24	-2,155616006
2	3168	0,265625	8,06	-1,175270415
3	3936	0,421875	8,28	-0,601543551
4	5016	0,578125	8,52	-0,147287035
5	7104	0,734375	8,87	0,281917795
6	7272	0,890625	8,89	0,794336831

Tabla 22 Tabla de Regresión Lineal Sist. de Transmisión - Línea Funcional 1 Etapa 1

N° de Falla	Tiempo de Falla (hr)	Rangos Medianos	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(i))))
i	ti	F(i)	xi	yi
1	1056	0,083333333	6,96	-2,441716399
2	2736	0,202380952	7,91	-1,486670964
3	3168	0,321428571	8,06	-0,947354424
4	3360	0,44047619	8,12	-0,543574052
5	7200	0,55952381	8,88	-0,198574256
6	7968	0,678571429	8,98	0,12661497
7	8160	0,797619048	9,01	0,468504666
8	13800	0,916666667	9,53	0,910235093

Tabla 23 Tabla de Regresión Lineal Ducto Agua Proceso - Línea Funcional 1 Etapa 1

ANEXO 1.2: Gráfico Regresión Lineal Línea 1 Etapa 1.

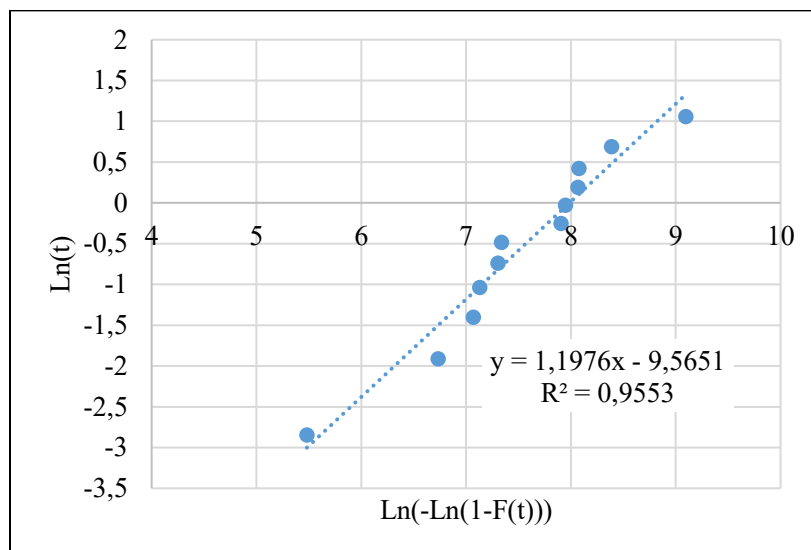


Gráfico 9 Regresión Lineal Bomba Centrífuga Línea Funcional 1 Etapa 1

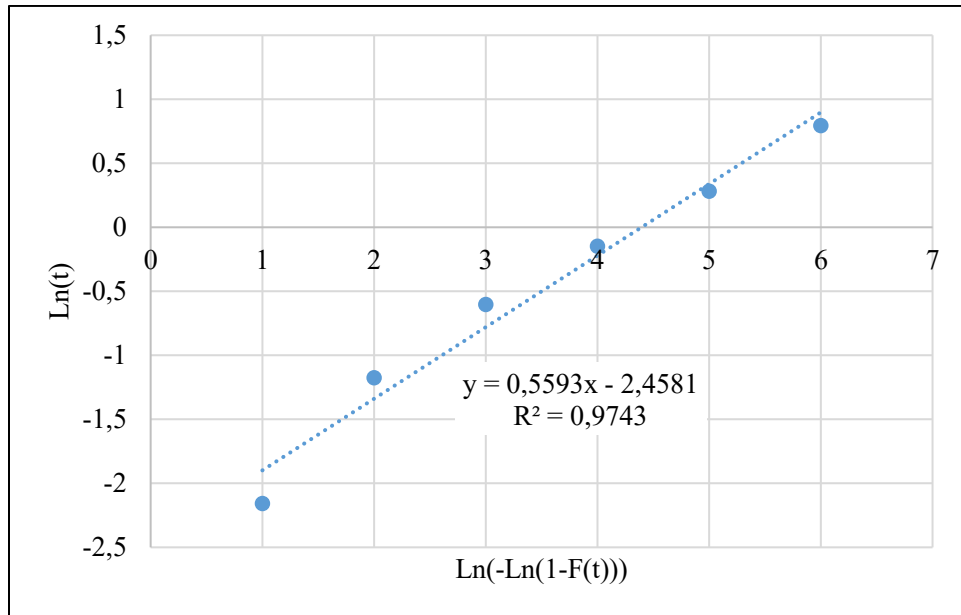


Gráfico 10 Regresión Lineal Sistema de Transmisión - Línea Funcional 1 Etapa 1

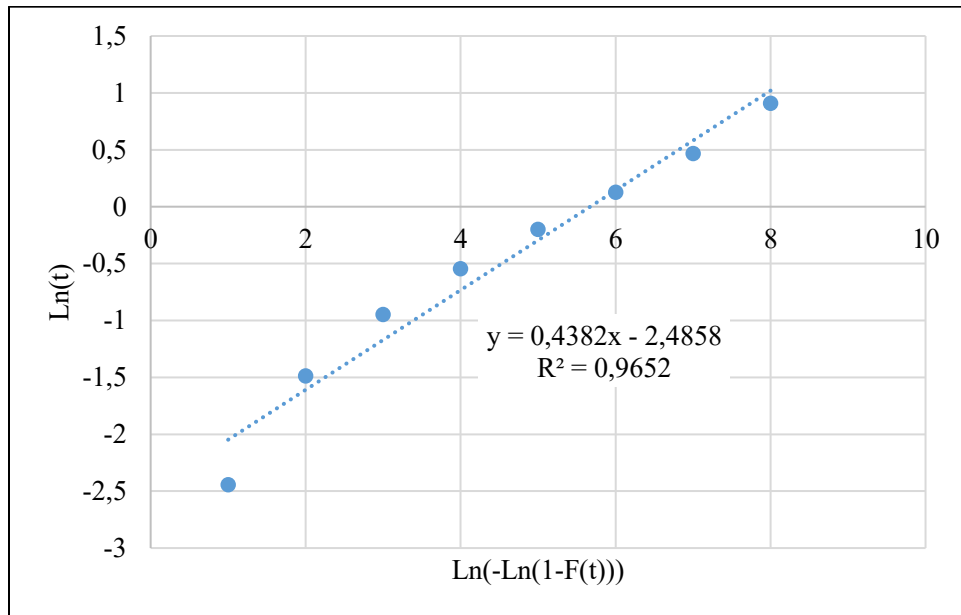


Gráfico 11 Regresión Lineal Ducto Agua Proceso - Línea Funcional 1 Etapa 1

ANEXO 1.3: Costos de intervención preventiva y correctiva (Cp y Cc)

Costos Preventivos Cp

Item	Repuesto	Costo mano de obra	Tiempo de detención	Costo preventivo (USD/Evento)
Bomba Centrífuga	14000	40	6	14240
Sistema de transmisión	2800	20	5	2900
Ducto Agua Proceso	1000	20	3	1060

Tabla 24 Costos Preventivos Bomba Centrífuga, Sistema de Transmisión y Ducto de Agua Proceso.

Costos Correctivos Cc

Item	Costo preventivo	Costo ineficiencia	Tiempo de detención	Costo de emergencia (USD/Evento)
Bomba Centrífuga	14240	922	6	19772
Sistema de transmisión	2900	922	5	7510
Ducto Agua Proceso	1060	922	3	3826

Tabla 25 Costos Correctivos Bomba Centrífuga, Sistema de Transmisión y Ducto de Agua Proceso.