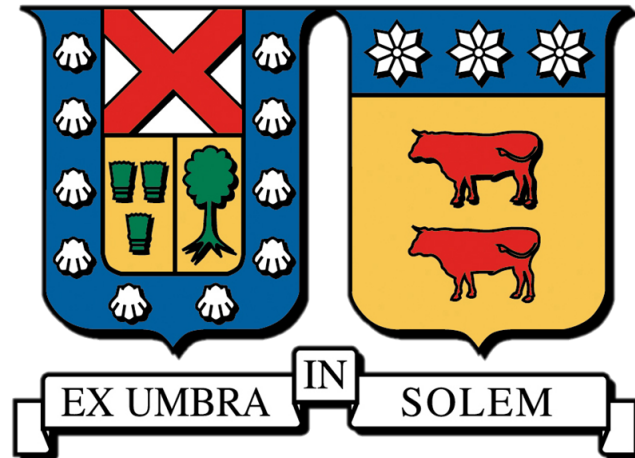


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**PROPUESTA DE MEJORA DEL PLAN DE
MANTENIMIENTO DE COMPONENTES
CRÍTICOS DEL BANCO DE PRUEBAS EN
EMPRESA DEL RUBRO HIDRÁULICO**

NICOLÁS FERNANDO GALINDO MAGNA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : ING. LUIS GUZMÁN BONET
PROFESOR CORREFERENTE : ING. NELSON ÁLVAREZ CAMPILAY

ENERO, 2020

Agradecimientos

Le doy gracias a mis padres Fernando y Olga por inculcarme tantos valores importantes para la vida y por las tantas oportunidades que me dieron después de caerme un par de veces, sin dejar de apoyarme en todo momento.

A mi hermana, por darme la posibilidad de disfrutar a mis sobrinos Matilda y Diego, que llenan mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

A mi polola, por haberme apoyado, centrado y ser mi cable a tierra en los momentos más difíciles y los no tanto.

A toda mi familia por los buenos momentos que vivimos. En especial a la “mami” (QEPD). Lamento que no estés para verme titulado, y gracias por el apoyo que siempre me diste cuando pasaba a tomar once después de la universidad, o cuando me llamabas todos los domingos antes de recogerme a la Escuela de Aviación. Este logro es para ti.

A mis amigos de la vida, por cada cerveza que compartimos y los grandes momentos e historias juntos.

A mis compañeros de Universidad, que hicieron que el rigor fuera más agradable.

A mis camaradas de la FACH, por ese espíritu de cuerpo tan grande que no cambia con el tiempo.

Al profesor Luis Guzmán por la oportunidad de ser mi profesor guía, por el tiempo dedicado y por haber compartido conmigo sus conocimientos.

A Guillermo Flores, Gerente de Servicios y Proyectos, y a todo el equipo de la empresa por haberme dado la oportunidad de desarrollar mi memoria y compartir su gran conocimiento.

“El sansano así se forma para no desorientarse jamás, pese al desorden y la confusión”
Nicolás.

Resumen

La empresa del rubro hidráulico, es una empresa de servicios de reparación y venta de insumos de su categoría. Tiene participación como empresa contratista en compañías de la gran minería, así como también en todo tipo de reparación que tenga relación al mundo de la oleohidráulica. El sello de calidad de la empresa en sus reparaciones está directamente relacionado a uno de sus activos: el banco de pruebas hidráulico, cuya operación es sumamente crítica para el proceso productivo de la empresa.

El objetivo general de este trabajo de título es generar una propuesta de mejora al plan de mantenimiento para el banco de pruebas hidráulico. Para lograrlo, se aplica la metodología de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM. Para aplicar el método, se utiliza el análisis de modos y efectos de falla (FMEA) acompañado de un análisis de criticidad basado en el número de prioridad de riesgo (RPN). Para luego, con los modos de falla más críticos, realizar un análisis más profundo de acuerdo al diagrama de decisión RCM y generar las tareas a realizar con sus intervalos de aplicación.

Como resultado principal, tenemos el costo del plan anual de mantenimiento, que asciende a la suma de CLP \$78,529,839.

A continuación, se resume el contenido de cada capítulo.

- Capítulo 1: Se muestran los antecedentes de la empresa, en conjunto con el marco estratégico del negocio, el proceso productivo y el plan de mantenimiento utilizado en todos sus activos, en especial para el banco de pruebas hidráulico.
- Capítulo 2: Se definen las bases teóricas que se utilizarán en el análisis posterior, pasando por la historia del mantenimiento, el análisis de modos y efectos de fallas, la criticidad de sistemas y el proceso RCM. Además, se introducen los conceptos de mantenimiento como la confiabilidad, tasa de falla, disponibilidad, entre otros indicadores. Por otro lado, se explican algunos conceptos hidráulicos culminando en un modelo de costos de mantenimiento preventivo y correctivo.
- Capítulo 3: Se explica el funcionamiento del banco de pruebas, sus componentes y se definen los sistemas de prueba a analizar en el proceso RCM.
- Capítulo 4: Se ejecuta el todo el proceso de mantenimiento, pasando por el análisis FMECA, culminando en la hoja de decisión RCM.

- Capítulo 5: Se analiza el resultado del plan piloto de mantenimiento, considerando un análisis de las tareas recomendadas y si son compatibles con las tareas de mantenimiento comunes en la oleohidráulica. Además, se proyecta el indicador de disponibilidad del banco de pruebas a través del juicio experto de los técnicos hidráulicos.
- Capítulo 6: Se aplica el modelo de costos a las tareas propuestas en el plan de mantenimiento.
- Capítulo 7: Se proponen algunas mejoras a la gestión del mantenimiento de la empresa, en especial al banco de pruebas.
- Capítulos restantes: Corresponden a las conclusiones y recomendaciones, bibliografía y anexos.

Abstract

The hydraulic sector company, it's an company of repairing and sales of supplies of its category. It participates as a contractor company in the great mining industry, as well as all type of oleo hydraulic related repairing. The company quality seal on its repairing its directly related to one of their actives: the hydraulic test bank, which operation is highly critical to the entire productive process of the company.

The main goal of this work title, is to create an improvement proposal for the maintenance plan of the hydraulic test bank. To achieve this, the reliability centered maintenance (RCM) methodology is applied. To apply this method, the failure modes and effect analysis (FMEA) is applied along with criticity analysis based on the risk priority number (RPN). Then, with the most critical failure modes, perform a deeper analysis according to the RCM decision diagram and generate the tasks to be performed with their application intervals.

As a main result, we have the cost of the annual maintenance plan, which amounts to the sum of CLP \$78,529,839.

The content of each chapter is summarized below:

- Chapter 1: The company records are presented along with the strategic framework of the bussiness, the production process and the maintenance plan used in all its assets, especially for the hydraulic test bench.
- Chapter 2: The theoretical bases that will be used in the subsequent analysis are defined, including the maintenance history,, the analysis of failure modes and effects, the criticality of systems and the RCM process. In addition, maintenance concepts such as reliability, failure rate, availability, among other indicators are introduced. On the other hand, some hydraulic concepts are explained culminating in a model of preventive and corrective maintenance costs.
- Chapter 3: The operation of the test bench, its components and the test systems to be analyzed in the RCM process are explained.
- Chapter 4: The whole maintenance process is executed, including the FMECA analysis and the RCM decision sheet.

- Chapter 5: The result of the pilot maintenance plan is analyzed, considering an analysis of the recommended tasks and whether they are compatible with the maintenance tasks common in oil hydraulic. In addition, the test bench availability indicator is projected through the expert judgment of hydraulic technicians.
- Chapter 6: The cost model is applied to the tasks proposed on the maintenance plan.
- Chapter 7: Some improvements to the company's maintenance managing are proposed.
- Remaining chapters: Conclusions and recommendations, bibliography and appendix.

Glosario

FMEA Análisis de Modos y Efectos de Falla.

FMECA Análisis de Modos, Efectos de Falla y Criticidad.

JIT Just in Time.

RCM Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

RPN Risk Priority Number, Número de prioridad del riesgo.

ST Servicio Técnico.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	IV
Introducción	1
Objetivos	2
Descripción del problema	3
Plan de trabajo	4
1 Contexto de la empresa	6
1.1 Breve reseña de la empresa	6
1.1.1 Tamaño de la empresa	6
1.1.2 Marco Estratégico de la empresa	7
1.1.3 Proceso de reparación de un componente oleohidráulico	8
1.2 Situación actual del plan de mantenimiento	9
2 Marco Teórico	10
2.1 Mantenimiento	10
2.2 Desarrollo del mantenimiento a lo largo de la historia	10
2.2.1 Primera generación	11
2.2.2 Segunda generación	11
2.2.3 Tercera generación	12
2.3 Mantenimiento centrado en la confiabilidad	14
2.3.1 Siete preguntas del RCM	14
2.3.2 Patrones de fallas	14
2.4 Análisis de modos y efectos de fallas	16
2.4.1 Funciones	16
2.4.2 Modos de falla	17
2.4.3 Efectos de falla	19
2.5 Consecuencias de falla	19

2.5.1	Fallas ocultas y evidentes	20
2.5.2	Consecuencias de seguridad, entorno, operacionales y no operacionales	20
2.6	Criticidad de sistemas	21
2.6.1	Análisis del riesgo	22
2.7	Estrategia de mantenimiento	24
2.7.1	Tareas preventivas	24
2.7.2	Acciones a falta de	27
2.8	Proceso RCM	28
2.8.1	Hoja de información	29
2.8.2	Hoja de decisión	30
2.8.3	Diagrama de decisión RCM	31
2.9	Conceptos útiles de mantenimiento	33
2.9.1	Mantenibilidad	33
2.9.2	Confiabilidad	33
2.9.3	Probabilidad acumulada de fallas	33
2.9.4	Tasa de falla	33
2.9.5	Tiempo medio para fallar MTTF	34
2.9.6	Tiempo medio entre fallas MTBF	34
2.9.7	Relaciones útiles	35
2.9.8	Disponibilidad	35
2.10	Conceptos hidráulicos	36
2.10.1	Circuitos	36
2.11	Modelo de costos para el plan de mantenimiento	37
2.11.1	Costos de intervenciones por mantenimiento	37
2.12	Metodología para planes de acción: 5W-1H	39
3	Análisis Funcional	41
3.1	Breve reseña del banco de pruebas	41
3.2	Tipos de pruebas	43
3.3	Descripción de sistemas	43
3.3.1	Sistema de prueba para bombas, divisores de flujo y toma fuerza (Sistema n°1)	43
3.3.2	Sistema de prueba de motores y comandos de válvulas (Sistema n°2)	45
3.3.3	Sistema de prueba para orbitroles y cilindros (Sistema n°3)	49
3.3.4	Sistema de trasvasije y enfriamiento (Sistema n°4)	51
3.3.5	Sistema de conexiones y transporte de fluidos (Sistema n°5)	52
4	Proceso y análisis de mantenimiento	56
4.1	Equipo de trabajo	56
4.2	FMECA	57
4.2.1	Modos de falla	58

4.2.2	Análisis de riesgo	58
4.2.3	Análisis de causas potenciales	61
4.3	Hoja de decisión RCM	62
5	Plan piloto de mantenimiento y disponibilidad proyectada	63
5.1	Plan piloto de mantenimiento	63
5.2	Proyección de disponibilidad del banco	65
6	Costos relativos al plan de mantenimiento	67
6.1	Tiempos y costos asociados al banco de pruebas	67
6.1.1	Tiempo de uso	67
6.1.2	Tiempo de reparación de un componente del banco de pruebas	67
6.1.3	Costo de ineficiencia	67
6.1.4	Insumos	68
6.1.5	Costo de Horas hombre	68
6.2	Costos del plan piloto	68
6.2.1	Costos correctivos	69
6.2.2	Costos preventivos	69
7	Propuestas de mejora	70
7.1	Plan de acción	70
7.1.1	Enfoque reducción de accidentes	70
7.1.2	Enfoque mejora de control en operación y mantenimiento	70
8	Conclusiones y recomendaciones	74
A	Documentos empresa	79
A.1	Hoja de vida para registro de mantenimiento	79
A.2	Registros de mantenimiento hasta la fecha	79
B	Banco de pruebas	82
B.1	Vista general del banco de pruebas	82
B.2	Sistema 1: Prueba de bombas, divisores de flujo y toma fuerza	82
B.3	Sistema 2: Prueba de motores y comandos de válvula	82
B.4	Sistema 3: Prueba de orbitroles y cilindros	82
B.5	Sistema 4: Sistema de trasvasije y enfriamiento	82
C	FMECA	88
C.1	Sistema 1	88
C.2	Sistema 2	88
C.3	Sistema 3	88
C.4	Sistema 4	88
C.5	Sistema 5	88

D	Análisis estadístico de los modos de falla	102
E	Decisión RCM	107
	E.1 Sistema 1	107
	E.2 Sistema 2	107
	E.3 Sistema 3	107
	E.4 Sistema 4	107
	E.5 Sistema 5	107
F	Costos asociados al plan de mantenimiento	122
	F.1 Costos correctivos	122
	F.2 Costos preventivos	122
G	Propuestas de mejora para el banco de pruebas	134
	G.1 Registro de información para el uso del banco de pruebas	134
	G.2 Registro de información para intervenciones preventivas	134
	G.3 Registro de información para intervenciones correctivas	134

Índice de figuras

1	Proceso de trabajo utilizado en el desarrollo de la memoria.	5
1.1	Flujo del proceso de reparación de un componente. Fuente: Gerencia de servicio y proyectos.	8
2.1	Generaciones del mantenimiento (Fuente: Moubray [1]).	11
2.2	Patrones de falla a lo largo de las generaciones de mantenimiento (Fuente: Moubray [1]).	13
2.3	Cambios en las técnicas de mantenimiento (Fuente: Moubray [1]).	13
2.4	Seis patrones de falla antes mencionados. (Recuperado el 22 de Julio de 2019 de www.weibull.com)	15
2.5	Ejemplo de función, falla funcional y modo de falla según Moubray. [1]	17
2.6	Intervalo P-F de acuerdo a la norma SAE JA1012 [6].	26
2.7	Proceso RCM en base a artículo FMECA de Aguilar - Torres - Magaña [11].	29
2.8	Hoja de información propuesta por Moubray utilizando un ejemplo para un FMEA [1].	29
2.9	Hoja de decisión propuesta por Moubray [1].	31
2.10	Diagrama de decisión RCM II propuesto por Moubray [1].	32

2.11	Tiempo medio entre fallas [2].	34
2.12	Ejemplo de un circuito abierto. Notar que en (5) la tubería de aspiración se alimenta directamente de tanque, para luego dirigir el flujo a través de una válvula direccional (10) hacia la entrada, y posterior la salida hacia tanque. [9]	36
2.13	Ejemplo de un circuito cerrado. Se aprecia que la alimentación de la bomba viene del consumidor. [9]	37
3.1	Banco de pruebas vista frontal.	41
3.2	Banco de pruebas vista trasera.	42
3.3	Vista frontal CAD. (Fuente: elaboración propia)	42
3.4	Palanca de válvula selectora (componente n°52).	46
3.5	Panel de ajustes banco de pruebas	47
3.6	Válvula divisora de flujo (auger-spinner) (Componente n°53).	48
3.7	Terminales de prueba para pilotajes y actuadores.	49
3.8	Palanca de válvula selectora (componente n°53).	50
3.9	Data Logger utilizado para la medición de parámetros (componente n°70).	53
3.10	Manifold de alimentación (componente n°71).	53
3.11	Flexibles (componente n°72).	54
3.12	Cañerías (componente n°73).	54
3.13	Conectores o terminales (componente n°74).	55
4.1	Modos de falla con una frecuencia mayor a 5. (Fuente: Datos obtenidos del análisis FMECA)	58
4.2	Diagrama de Pareto del RPN asociado con su frecuencia en los datos. (Fuente: extracción de datos obtenidos en el análisis FMECA)	59
4.3	Gráfico de causas potenciales, con respecto a su frecuencia en los datos del FMECA. Se destaca que la mayor cantidad de causas potenciales se obtiene del juicio experto de los técnicos hidráulicos, lo que también se complementa con los manuales de fallas que se encuentran en la información técnica de la empresa.	61
5.1	Gráfico de las tareas propuestas y su distribución.	64
7.1	Matriz 5W-1H para el plan de acción propuesto (parte 1). Fuente: elaboración propia en base a lo expuesto por el artículo “Las 5W + H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos” [13].	72
7.2	Matriz 5W-1H para el plan de acción propuesto (parte 2). Fuente: elaboración propia en base a lo expuesto por el artículo “Las 5W + H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos” [13].	73
B.1	Vista general del levantamiento al banco de pruebas hidráulico. (Fuente: Elaboración propia)	83

B.2	Sistema de prueba de bombas, divisores de flujo y toma fuerza de acuerdo a los datos levantados en el banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia)	84
B.3	Sistema de prueba de motores, comandos de válvula de acuerdo a los datos levantados en el banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia)	85
B.4	Sistema de prueba de orbitroles y cilindros de acuerdo a los datos levantados en el banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia)	86
B.5	Sistema de trasvasije, conteo de partículas y enfriamiento. (Fuente: Elaboración propia)	87
G.1	Hoja propuesta para obtener información con cada uso del banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.	135
G.2	Hoja propuesta para registrar las intervenciones programadas a cada componente del banco. Fuente: elaboración propia.	136
G.3	Hoja propuesta para registrar las fallas registradas en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.	137

Índice de tablas

1.1	Clasificación de empresas por cantidad de personas según la Ley N°20.416 del Gobierno de Chile.	7
1.2	Pauta de mantenimiento utilizada en la empresa. Fuente: Gerencia de servicio y proyectos.	9
2.1	Escala de severidad (S) de acuerdo a la norma J SAE 1739 [8].	23
2.2	Escala de ocurrencia (O) de acuerdo a la norma J SAE 1739 [8].. . . .	23
2.3	Escala de detectabilidad (D) de acuerdo a la norma J SAE 1739 [8].. . . .	24
3.1	Listado de componentes del sistema n°1.	45
3.2	Listado de componentes del sistema n°2.	46
3.3	Listado de componentes del sistema n°3.	50
3.4	Listado de componentes del sistema n°4.	52
3.5	Listado de componentes del sistema n°5.	52
4.1	Listado de componentes filtrados para confeccionar el análisis FMEA.	57
4.2	Códigos de limpieza “ISO”. Tabla extraída de la norma ISO 4406 [10].	62
5.1	Disponibilidad proyectada a través del juicio experto de los técnicos hidráulicos.	66

A.1	Hoja de vida utilizada actualmente para el mantenimiento de activos. (Fuente: Gerencia de servicios y proyectos de empresa.)	79
A.2	Registros de todos los mantenimientos realizados al banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento de datos.)	80
A.3	Registros levantados de todos los mantenimientos realizados al banco de pruebas (continuación).	81
C.1	Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 1).	89
C.2	Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 2).	90
C.3	Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 3).	91
C.4	Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 4).	92
C.5	Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 5).	93
C.6	Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 6).	94
C.7	Análisis FMECA para el sistema 2 (parte 1).	95
C.8	Análisis FMECA para el sistema 2 (parte 2).	96
C.9	Análisis FMECA para el sistema 2 (parte 3).	97
C.10	Análisis FMECA para el sistema 2 (parte 4).	98
C.11	Análisis FMECA para el sistema 3.	98
C.12	Análisis FMECA para el sistema 4.	99
C.13	Análisis FMECA para el sistema 5 (parte 1).	100
C.14	Análisis FMECA para el sistema 5 (parte 2).	101
D.1	Análisis estadístico de los modos de falla (parte 1).	103
D.2	Análisis estadístico de los modos de falla (parte 2).	104
D.3	Análisis estadístico de los modos de falla (parte 3).	105
D.4	Análisis estadístico de los modos de falla (parte 4).	106
E.1	Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 1).	108
E.2	Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 2).	109
E.3	Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 3).	110
E.4	Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 4).	111
E.5	Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 1).	112
E.6	Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 2).	113
E.7	Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 3).	114
E.8	Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 4).	115
E.9	Hoja de decisión RCM para sistema 3 (parte 1).	116
E.10	Hoja de decisión RCM para sistema 3 (parte 2).	117
E.11	Hoja de decisión RCM para sistema 3 (parte 3).	118
E.12	Hoja de decisión RCM para sistema 4 (parte 1).	119
E.13	Hoja de decisión RCM para sistema 4 (parte 2).	120
E.14	Hoja de decisión RCM para sistema 5.	121
F.1	Costos correctivos para el plan piloto de mantenimiento.	123
F.2	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 1) . . .	124

F.3	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 2)	. . . 125
F.4	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 3)	. . . 126
F.5	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 4)	. . . 127
F.6	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 5)	. . . 128
F.7	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 6)	. . . 129
F.8	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 7)	. . . 130
F.9	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 8)	. . . 131
F.10	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 9)	. . . 132
F.11	Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 10)	. . . 133

Introducción

La empresa en análisis, pertenece al rubro de servicios de mantenimiento, ingeniería y venta de repuestos oleohidráulicos, además posee un gran prestigio a lo largo de sus 50 años en el mercado, destacándose por su alta calidad en el desarrollo de soluciones para sus clientes.

Con respecto a la competencia, la empresa tiene un valor agregado, el cual es poseer entre sus activos un banco de pruebas hidráulico con prestaciones únicas en latinoamérica. Es de tal importancia este activo, que en su ausencia, las reparaciones realizadas son poco confiables y quitan el sello de calidad ofrecido. Sin embargo, a pesar de ser un activo crítico en el proceso, no cuenta con un plan de mantenimiento adecuado. Es por ello que se aprecia una oportunidad de mejora y beneficio para la empresa.

Objetivos

El objetivo general del trabajo de titulación es “generar una propuesta de mejora del plan de mantenimiento para el banco de pruebas del área de servicio técnico de una empresa del rubro hidráulico, con la finalidad de mejorar el nivel de disponibilidad en el proceso productivo de la empresa de manera sustentable”.

Para lograr este objetivo, se requiere de los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un levantamiento del contexto operacional de los equipos involucrados en el banco de pruebas, considerando estructura técnica del objeto, datos históricos y plan de mantenimiento utilizado actualmente.
- Analizar técnicamente los componentes críticos del banco de pruebas hidráulico en base a un análisis de modos de falla, con el objetivo de minimizar defectos en el funcionamiento del equipo.
- Elaborar plan de mejora para el mantenimiento del banco de pruebas hidráulico acorde a la situación actual de la empresa considerando la participación de las partes interesadas.
- Proyectar la disponibilidad global del banco de pruebas hidráulico y sus beneficios en la competitividad de la empresa.
- Evaluar el impacto económico, ambiental y de seguridad operacional asociado a la implementación de esta estrategia de mantenimiento.

Descripción del problema

La empresa hidráulica se cataloga como una empresa de servicios de mantenimiento y venta de insumos oleohidráulicos. Sus clientes abarcan todo tipo de rubros en los cuales exista algún componente oleohidráulico, sin embargo los más importantes se centran en empresas de la gran minería, empresas de servicios a la minería y empresas constructoras.

En toda su trayectoria, se ha mantenido el sello de calidad en sus trabajos de reparación, sin embargo con el pasar de los años la competencia ha ido en aumento por lo que se ha requerido ir agregando valor al proceso productivo para seguir siendo la mejor opción en hidráulica. Entrando en detalle con este valor agregado, desde el año 2003 se ha implementado un banco de pruebas hidráulico con el fin de garantizar la calidad de las reparaciones, considerando pruebas en condiciones de operación normales.

A pesar de lo importante que resulta ser el banco de pruebas (que es un equipo crítico dentro del proceso) no existe claridad con respecto a la totalidad de componentes internos involucrados. Además, la rutina actual de mantenimiento se basa únicamente en un mantenimiento preventivo cada 450 horas, sin entrar al detalle de dichos componentes internos y su criticidad dentro del sistema. Tampoco se cuenta con un registro histórico de las fallas ocurridas hasta la fecha, por lo cual no es factible realizar un análisis estadístico para el mantenimiento. Por esta razón para proyectar la disponibilidad global del banco de pruebas es necesario hacer un levantamiento de datos de acuerdo a la experiencia de los técnicos más expertos.

Para lograr este objetivo se requiere de un aprovechamiento eficiente de los tiempos muertos del banco de pruebas para ir realizando el levantamiento de datos.

Plan de trabajo

Para confeccionar el plan de mantenimiento al banco de pruebas hidráulico se utilizará como base la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, es por ello que se realizarán las siguientes etapas:

- i. Levantamiento de la estructura técnica de objeto del banco de pruebas. Cabe destacar que no existe información anterior de planes de mantenimiento centrados en la confiabilidad para estos equipos, sin embargo se cuenta con la información histórica de algunos mantenimientos programados.
- ii. Revisión de la funcionalidad de los equipos de acuerdo a los distintos modos de prueba considerando la definición de subsistemas.
- iii. Confección del equipo de trabajo para la revisión del FMECA y RCM.
- iv. Análisis de modos y efectos de falla de los sistemas más críticos considerando a los stakeholders.
- v. Elección de los componentes más críticos del proceso de prueba en base a un análisis de criticidad, utilizando el número de prioridad de riesgo RPN.
- vi. Estudio y análisis de la confiabilidad de los equipos críticos basados en la norma SAE JA1011 [5] y JA1012 [6].
- vii. Definir las tareas de mantenimiento mediante el uso del diagrama de decisiones RCM y generar pautas de tareas para su uso en el banco de pruebas.
- viii. Proyectar la disponibilidad global del banco de pruebas en base al juicio experto de los técnicos hidráulicos.
- ix. Evaluar el impacto económico, ambiental y de seguridad operacional de la implementación del plan propuesto.

Diagrama del plan de trabajo

A continuación se presenta un diagrama del plan de trabajo a realizar.

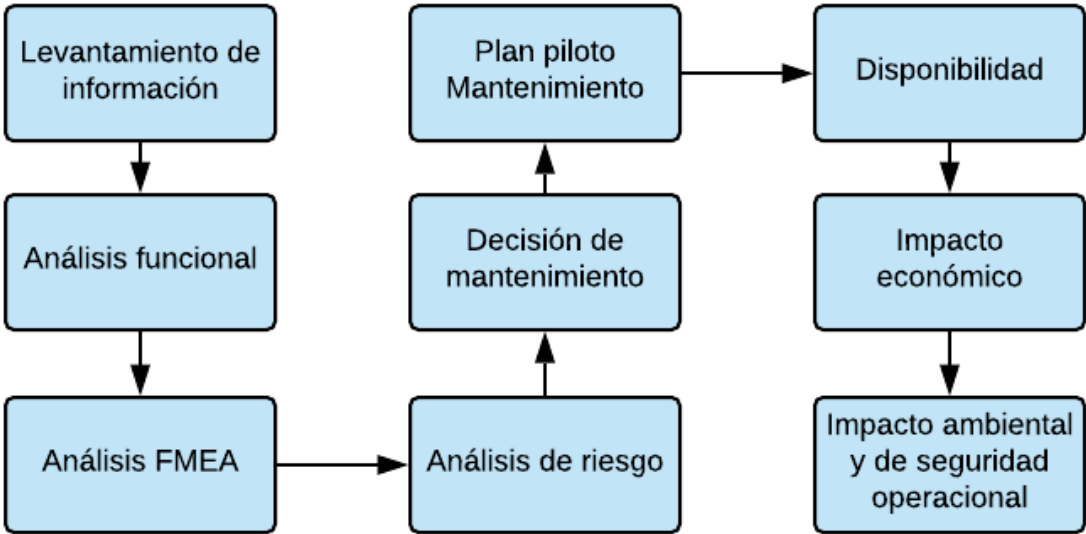


Figura 1: Proceso de trabajo utilizado en el desarrollo de la memoria.

Capítulo 1

Contexto de la empresa

En este primer capítulo se presenta una breve reseña de la empresa, una descripción del contexto y su estrategia de negocios.

1.1. Breve reseña de la empresa

La empresa hidráulica está catalogada como una empresa de servicios del rubro hidráulico con más de 50 años en el mercado. Entre sus actividades se tiene la reparación y venta de componentes hidráulicos, además de proyectos varios relacionados al rubro. Por otro lado, se cuenta con personal altamente especializado, productos de calidad y un alto stock de repuestos para satisfacer las necesidades de sus clientes. Entre los distintos departamentos con que cuenta la empresa, se tiene el área de servicio técnico (ST), cuya misión es ejecutar todas las actividades técnicas que realiza la empresa. Además se cuenta con un banco de pruebas hidráulico, cuya utilidad es aportar un proceso clave para garantizar la calidad en los distintos trabajos ofrecidos a los clientes. Por otro lado, la empresa cuenta con la certificación de las marcas más importantes del rubro, como Rexroth, Danfoss, Parker, Oilgear.

1.1.1. Tamaño de la empresa

Para determinar el tamaño de la empresa, de acuerdo a la legislación vigente del Gobierno de Chile, se tienen dos criterios: de acuerdo a ventas anuales, y de acuerdo al número de trabajadores.

En primer lugar, tenemos que la facturación mensual se encuentra dentro del rango de 25.000 a 100.000 UF, por lo que en términos de ventas, se encasilla perfectamente en una empresa mediana. Por el lado de la cantidad de trabajadores, se cuenta con 55 trabajadores entre todas sus áreas, por lo se encuentra en el rango de 25 a 200 trabajadores, por lo cual nuevamente se clasifica como una empresa mediana. Esto se puede apreciar de acuerdo a los datos expuestos en la tabla 1.1.

Tamaño empresa	Clasificación por ventas	Clasificación por empleo
Micro	0 - 2.400UF	0 - 9
Pequeña	2.400,01UF - 25.000UF	10 -25
Mediana	25.000,01UF - 100.000UF	25 - 200
Grande	100.000,01UF y más	200 y más

Fuente: Ley N° 20.416

Tabla 1.1: Clasificación de empresas por cantidad de personas según la Ley N°20.416 del Gobierno de Chile.

1.1.2. Marco Estratégico de la empresa

El marco estratégico se construye de acuerdo a su misión, visión, valores y objetivos estratégicos, los cuales se obtienen de la *Gerencia de Servicios y Proyectos* de la empresa y serán presentados a continuación:

Misión

“Ofrecer a nuestros clientes soluciones de calidad e innovadoras a través de un servicio de excelencia, con personas comprometidas y especializadas buscando el crecimiento rentable y sostenido en el tiempo”.

Visión

“Ser la mejor opción del mercado en soluciones oleohidráulicas para nuestros clientes”.

Valores

Actitud de servicio, cercanía, respeto, excelencia, calidad, honestidad, compromiso, seguridad

Objetivos estratégicos

- Excelencia y capacitación técnica en el área ST, además del cumplimiento de objetivos de acuerdo a la norma ISO 9001 (calidad y plazos de entrega).
- Orientación al cliente, a través del aumento de la cobertura, conocimiento, profundidad y presencia de la empresa con los actuales y nuevos clientes.
- Productos y soluciones innovadoras, fomentando el desarrollo y soluciones ya ejecutadas y desarrollando automatización a los sistemas oleohidráulicos.
- Gestión de personas, a través del diseño de una estrategia para la gestión de las personas de la empresa.

- Crecimiento rentable, con un aumento de las ventas de un 20% respecto al año anterior, además de la reducción del inventario sin movimiento.

1.1.3. Proceso de reparación de un componente oleohidráulico

Para reparar un componente oleohidráulico, se requiere de mano de obra y el uso de algunos activos físicos relacionados a las labores de la mano de obra. El flujo del proceso de reparación se muestra en la figura 1.1, en donde se aprecian distintos actores como lo son los clientes, el servicio al cliente (SAC), el jefe de servicio, los técnicos y el coordinador de servicio en terreno.

La mano de obra utilizada se centra principalmente en las labores de los técnicos, los cuales realizan los procesos de evaluación, reparación y prueba en banco. Esta última labor, depende directamente de un activo físico llamado *banco de pruebas hidráulico*, el cual es imprescindible para completar el proceso, que a su vez se debe alinear con el marco estratégico en el sentido de la calidad y excelencia. Además, se aprecia que sin el banco no hay forma de completar el proceso con alguna actividad paralela o alternativa, por lo que claramente es el activo físico más crítico de la empresa.

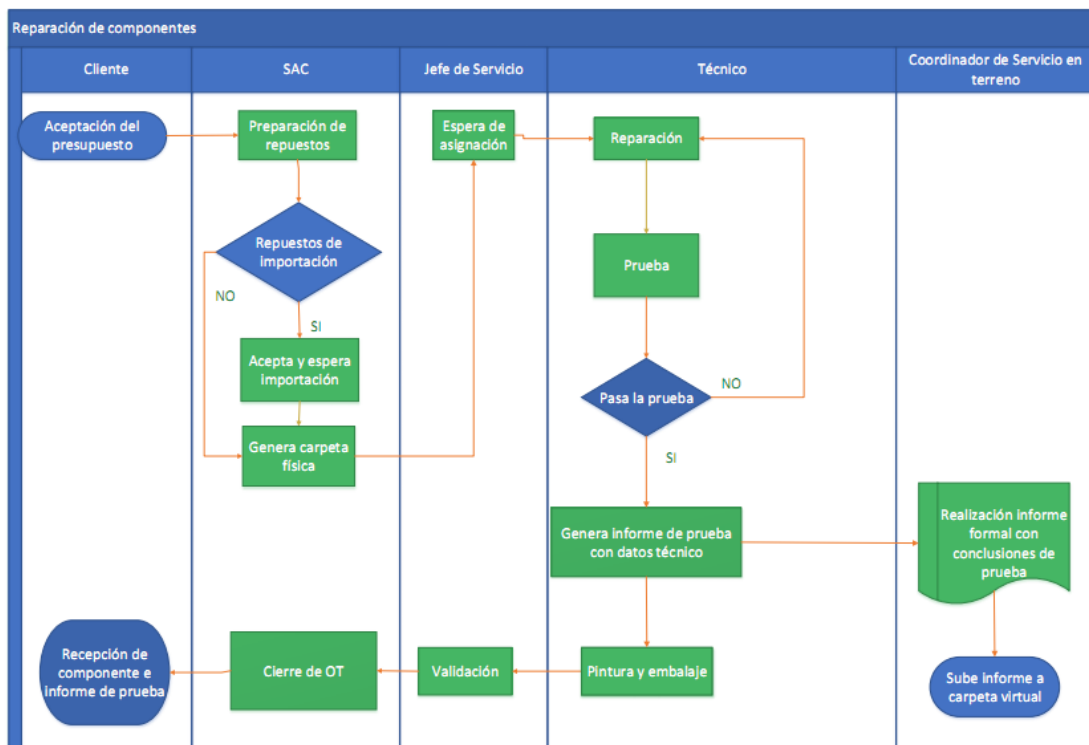


Figura 1.1: Flujo del proceso de reparación de un componente. Fuente: Gerencia de servicio y proyectos.

1.2. Situación actual del plan de mantenimiento

Los activos físicos de la empresa poseen un plan de mantenimiento basado en una intervención preventiva cada cierto tiempo, independiente de su condición. Esto se puede ver en la siguiente pauta de mantenimiento para toda la planta:

EQUIPO	IDENTIFICACIÓN	PLAN DE MANTENCIÓN	SVC. EXTERNO	FRECUENCIA
BCO. PRUEBAS HIDRAULICO PPAL.	B-01	PREVENTIVO	NO	450 HRS.
MOTOR DIESEL	MD-01	PREVENTIVO	NO	450 HRS.
MÁQUINA LAVADO SIMLEX 100	ML-02	PREVENTIVO	NO	1 MES
PRENSA MANUAL	PM-01	PREVENTIVO	NO	3 MESES
PRENSA HIDRAULICA	PM-02	PREVENTIVO	NO	3 MESES
COMPRESOR	COM-01	PREVENTIVO	SI	1000 HRS.
TECLE BCO. PRUEBA	TE-02	PREVENTIVO	NO	6 MESES
TECLE SALA LAVADO	TE-01	PREVENTIVO	NO	6 MESES
TECLE SALA ARMADO	TE-03	PREVENTIVO	NO	6 MESES
TORNO PARALELO CDL 6236	TOP-01	PREVENTIVO	NO	2 MESES
TORNO PARALELO DMTG	TOP-02	PREVENTIVO	NO	2 MESES
TALADRO PEDESTAL GRANDE	TAP-02	PREVENTIVO	NO	2 MESES
TALADRO PEDESTAL CHICO	TAP-01	PREVENTIVO	NO	2 MESES
TALADRO PEDESTAL VERDE	TAP-03	PREVENTIVO	NO	2 MESES
MANDRINADORA	MAND-01	PREVENTIVO	NO	2 MESES
LAPEADORA	LAP-01	PREVENTIVO	NO	2 MESES
MÁQUINA DE SOLDAR MIG 251	MS-01	PREVENTIVO	NO	2 MESES
MÁQUINA DE SOLDAR MIG 313	MS-03	PREVENTIVO	NO	2 MESES
MÁQUINA DE SOLDAR AL ARCO	MS-02	PREVENTIVO	NO	2 MESES
EQUIPO DE OXÍGENO HARRIS	OXI-01	PREVENTIVO	NO	2 MESES

Tabla 1.2: Pauta de mantenimiento utilizada en la empresa. Fuente: Gerencia de servicio y proyectos.

En específico, en el banco de pruebas hidráulico y el motor diésel (parte del banco de pruebas), se tienen las siguientes actividades preventivas (cada 450 horas):

- Cambio de filtros
- Inspección de fugas
- Inspección nivel de aceite
- Inspección nivel de refrigerante del enfriador
- Verificación del rendimiento de transmisión
- Conteo de partículas en las líneas del banco de pruebas
- Toma de rendimiento bombas Danfoss S45
- Revisión sistema eléctrico

Además, las actividades realizadas tanto preventivas como correctivas se registran en una hoja normada por la empresa, la cual se puede apreciar en el anexo A.1. Del mismo modo, todas las actividades registradas en la hoja anterior, se muestran en el anexo A.2 y A.3.

Con todos estos datos, podemos afirmar que no existe un plan de mantenimiento adecuado para el banco de pruebas, el cual posee la máxima criticidad dentro de los activos de la empresa.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se exponen los tópicos que guían este trabajo, con la finalidad sostener con bases sólidas la aplicación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

2.1. Mantenimiento

Según la norma militar norteamericana 721C [14] el concepto de mantenimiento se define como “Todas las acciones necesarias para conservar un ítem o restaurarlo a una condición específica”.

Otra definición según la norma británica BS-3811 [15] es “La combinación de todas las acciones técnicas y administrativas asociadas tendientes a conservar un ítem o restablecerlo a un estado tal que pueda realizar la función requerida”.

La norma francesa ANFOR NF X 60-10 [16] dice que el mantenimiento es “el conjunto de acciones que permiten conservar o restablecer un bien a un estado especificado o a una situación tal que pueda asegurar un servicio determinado”

Según Moubrey [1] el mantenimiento es “asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan”.

2.2. Desarrollo del mantenimiento a lo largo de la historia

El mantenimiento es un área que constantemente ha ido evolucionando en el tiempo producto del constante cambio que han tenido activos físicos, en términos de cantidad y variedad. Además, la mentalidad ha ido evolucionando con la experiencia, donde se ha ido evaluando hasta que punto las fallas en los equipos afectan a la seguridad

y medio ambiente, así como también, tener conciencia de la relación que existe entre el mantenimiento y la calidad del producto, sin dejar de lado la búsqueda de una alta disponibilidad en la planta en conjunto con costos acotados.

Según Moubray [1], la evolución del mantenimiento se puede dividir en generaciones, tal como se muestra en la figura 2.1:

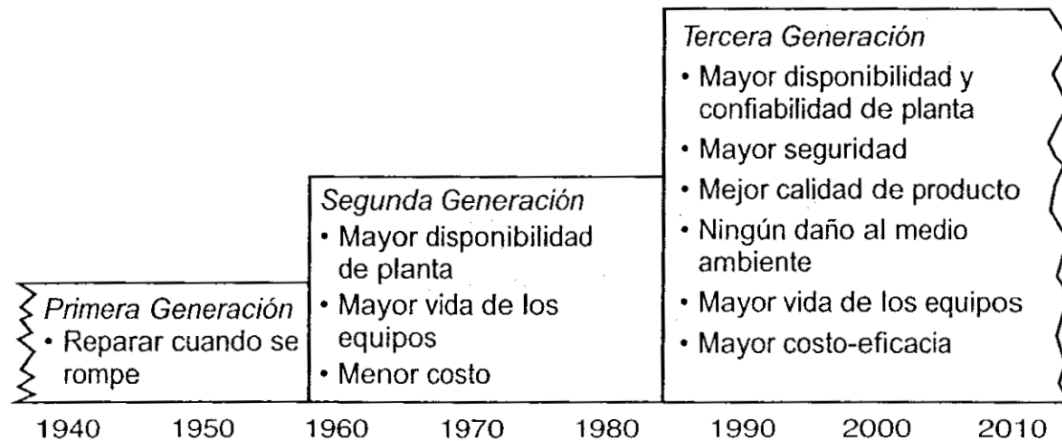


Figura 2.1: Generaciones del mantenimiento (Fuente: Moubray [1]).

2.2.1. Primera generación

La primera generación del mantenimiento se basaba en una industria poco mecanizada, por lo cual el tiempo de parada de un activo no era relevante. Esto significa que no existía una preocupación por la prevención de las fallas. Del mismo modo, los equipos estaban sobre dimensionados y poseían una lógica simple, por lo cual eran confiables y fáciles de reparar. Las rutinas de mantenimiento correspondían a limpieza y lubricación, por lo tanto las reparaciones se realizaban al momento de una falla.

2.2.2. Segunda generación

Gracias a la alta demanda de todo tipo de bienes durante la segunda guerra mundial, además de la baja constante de trabajadores en la industria, la mecanización de los procesos comenzó a aumentar. Posterior a esto aumentó considerablemente la cantidad y complejidad de los equipos, por lo que la industria aumentó su dependencia de estos activos y comenzó a concentrar la atención en los tiempos de parada de las máquinas. Esto llevó a la idea de que las fallas en los equipos podían y debían ser prevenidas, dando inicio al concepto de "mantenimiento preventivo". En la década del 60 el mantenimiento preventivo se basaba en intervenciones mayores a intervalos fijos, por lo cual el costo del mantenimiento aumentó rápidamente con respecto a los costos operacionales. A modo de controlar estos costos se desarrollan sistemas de planeamiento y

control del mantenimiento, los cuales lograron a tener el mantenimiento bajo control, disminuyendo los costos y por ende dar mayor vida útil a los activos.

2.2.3. Tercera generación

Desde la década de los 70, los cambios en el mantenimiento han aumentado explosivamente y se han clasificado en nuevas expectativas, nuevas investigaciones y nuevas técnicas.

Nuevas expectativas

La producción ha tenido un continuo aumento de su complejidad, lo cual significa que ante un periodo de nula productividad o bien la detención de un activo, los costos asociados a la ineficiencia aumentaron considerablemente. Con el pasar de los años, este escenario fue empeorando debido a la tendencia mundial del uso de sistemas *just in time*¹ (JIT) donde los reducidos inventarios de material de producción, hacen que una pequeña falla en algún equipo pueda detener toda la planta.

Actualmente, la mecanización y automatización están creciendo en torno a la **Confiabilidad** y a la **Disponibilidad**. Estos conceptos se han transformado en factores claves en todo tipo de sectores, debido a que la automatización trae consigo una mayor cantidad de fallas, las cuales afectan la capacidad de mantener los parámetros de calidad necesarios. Por otro lado, las fallas no solo traen consecuencias operacionales, sino que también consecuencias medioambientales y de seguridad para las personas. Por estas razones la integridad de los activos no solo radica en los costos, sino que también se torna una cuestión de supervivencia para una organización.

Nuevas investigaciones

Gracias a las nuevas investigaciones, se ha cambiado la creencia referida a la relación entre la edad de un activo y su falla. Inicialmente se creía que el envejecimiento estaba directamente relacionado con la falla, luego en la segunda generación se hablaba de la curva de la bañera (considerando la mortandad infantil), sin embargo, las investigaciones revelaron que no solo existen los patrones de falla anteriores, sino que en la práctica existen seis patrones de falla, tal como se muestra en la figura 2.2.

Las conclusiones más importantes de las nuevas investigaciones es que el gran número de tareas que se estaban realizando en la primera y segunda generación, muchas veces no logran ningún resultado mientras que otras tareas son contraproducentes y hasta peligrosas. [1]

¹La esencia de JIT es que los suministros llegan a la fábrica, o los productos al cliente, justo a tiempo, eso siendo poco antes de que se usen y solo en las cantidades necesarias

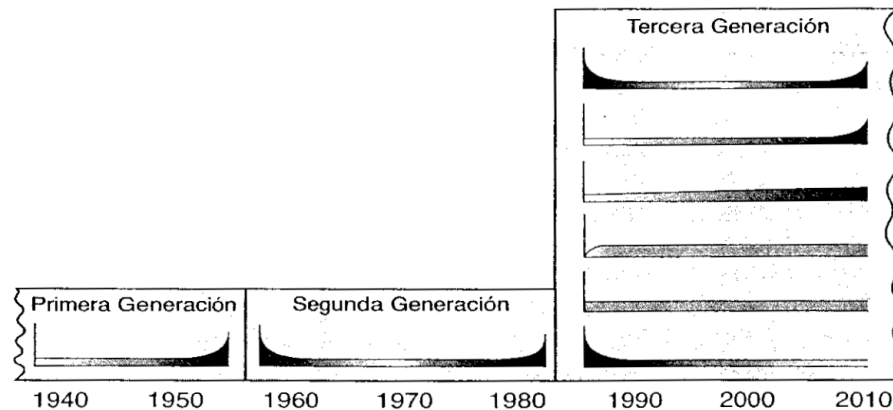


Figura 2.2: Patrones de falla a lo largo de las generaciones de mantenimiento (Fuente: Moubray [1]).

Nuevas técnicas

Durante las últimas décadas se han creado nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento (ver figura 2.3), entre las cuales tenemos:

- Herramientas de soporte para la toma de decisiones: estudios de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos y sistemas expertos.
- Nuevos métodos de mantenimiento: monitoreo de condición.
- Diseño de equipos: se tiene énfasis en la confiabilidad y la facilidad para el mantenimiento.
- Cambio del pensamiento de la organización: incluye la participación, trabajo en equipo y flexibilidad.

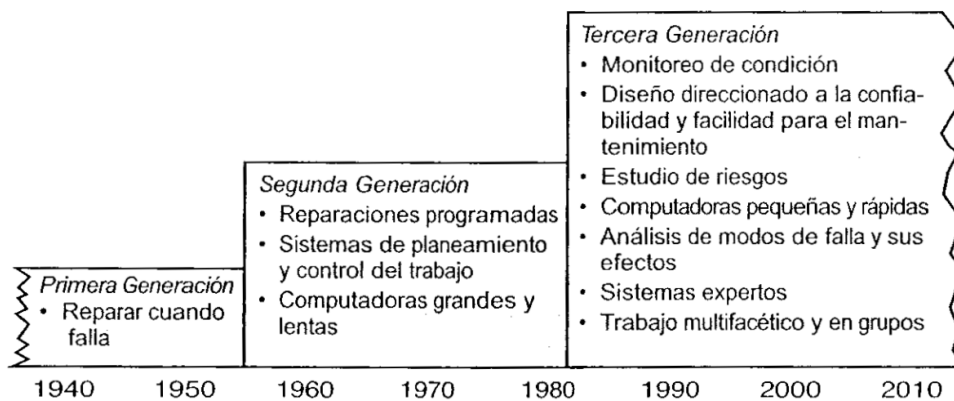


Figura 2.3: Cambios en las técnicas de mantenimiento (Fuente: Moubray [1]).

2.3. Mantenimiento centrado en la confiabilidad

Según la norma SAE JA1012 [6], el RCM se define como “*un proceso específico utilizado para identificar cuales políticas deben ser implementadas para manejar los modos de falla que podrían causar la falla funcional de un activo físico en un contexto operacional dado*”. Es decir, el RCM es una metodología de análisis que asegura que los equipos continúen realizando las funciones para los cuales fueron diseñados y además, que continúen realizando las labores que los usuarios finales desean que realicen durante toda su vida útil.

2.3.1. Siete preguntas del RCM

Según la norma SAE JA1011 [5], el proceso de un RCM manifiesta 7 interrogantes acerca de los activos o sistemas en que se desea aplicar esta metodología:

1. *¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su contexto de operación actual?* (funciones)
2. *¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?* (fallas funcionales)
3. *¿Cuál es la causa de cada falla funcional?* (modos de falla)
4. *¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?* (efectos de falla)
5. *¿En que sentido es importante cada falla?* (consecuencias de falla)
6. *¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?* (tareas preventivas o tareas a intervalos)
7. *¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea preventiva adecuada?* (acciones a falta de)

A continuación se analizarán los conceptos necesarios para responder a las preguntas mencionadas.

2.3.2. Patrones de fallas

En primer lugar, se debe entender mas a fondo los tipos de patrones de falla expuestos en la figura 2.2. Para ello se separan en letras tal como se aprecia en la figura 2.4.

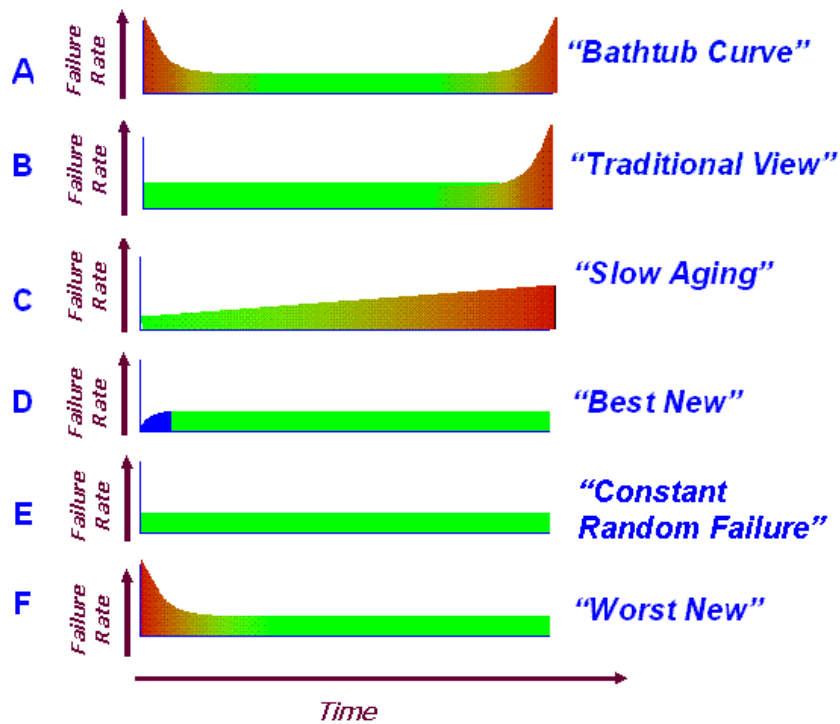


Figura 2.4: Seis patrones de falla antes mencionados. (Recuperado el 22 de Julio de 2019 de www.weibull.com)

El patrón **A**, es conocido como “*curva de la bañera*”. Comienza su vida útil con una gran probabilidad de fallas para luego decrecer y mantenerse constante hasta un punto de vida útil en el cual comienza nuevamente a aumentar su probabilidad de falla hasta la zona de desgaste.

El patrón **B** se refiere a la mirada tradicional de la falla, en donde durante su vida útil el activo presenta un comportamiento constante o de lento incremento a la falla, hasta que al final de su vida útil aumenta la probabilidad condicional hasta una zona de desgaste.

El patrón **C** muestra que la probabilidad condicional de falla aumenta lentamente, sin embargo no presenta una edad de desgaste claramente identificable.

El patrón **D** señala que al inicio de la vida útil (equipo nuevo) se tiene una baja probabilidad de falla, sin embargo al poco tiempo aumenta y se mantiene constante.

El patrón **E** muestra una probabilidad de falla constante a toda edad, lo cual señala que podría ocurrir una falla al azar.

El patrón **F** más conocido como “*mortandad infantil*”, señala que se comienza con

una alta probabilidad de fallar al inicio de la vida útil, para luego decrecer hasta un nivel constante que puede ir aumentando lentamente con el tiempo.

De acuerdo a lo expuesto por Moubray [1], la aviación comercial realizó un análisis estadístico de estos patrones de falla, resultando lo siguiente:

- Patrón A: 4 %
- Patrón B: 2 %
- Patrón C: 5 %
- Patrón D: 7 %
- Patrón E: 14 %
- Patrón F: al menos un 68 %

De esto podemos decir que la edad influye en un 11 % de los aviones, y el resto (89 %) se comporta de manera aleatoria. Además, el patrón **F** es el más común de los patrones de falla y este tipo de falla está asociado a malas condiciones de diseño, ensamblajes deficientes, incorrecta operación, mantenimiento innecesario o muy invasivo.

2.4. Análisis de modos y efectos de fallas

Para la aplicación de un proceso RCM se debe realizar un análisis de modos y efectos de falla (FMEA). Para ello se requiere entender cada una de las partes involucradas en este análisis.

2.4.1. Funciones

En un proceso RCM, se necesita saber cuales son las funciones que realiza un activo físico, es por ello que se requiere conocer los siguientes puntos:

- Determinar qué es lo que los usuarios quieren que haga.
- Asegurar que es capaz de realizar aquello que los usuarios quieren que haga.

Para conocer lo anterior se debe definir las funciones de cada activo en su contexto operacional en conjunto con sus parámetros de funcionamiento deseados. Para ello se pueden dividir las funciones en dos categorías:

1. Funciones primarias: definen el por qué de la adquisición de un activo. Se cubren temas como velocidad, producción, capacidad, calidad del producto, entre otras.

2. Funciones secundarias: definen lo que se espera que cada activo haga, más que cubrir sus funciones primarias. Estas funciones pueden ser seguridad, control, confort, integridad estructural, protección, economía, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales, entre otros.

Para definir una función se requiere de **un verbo, un objeto y un estándar de funcionamiento deseado por el usuario**.

2.4.2. Modos de falla

Para definir los modos de falla se requiere entender el concepto de una **falla funcional**, la cual también se conoce como estados de falla y se definen como los estados en donde un activo no puede cumplir una función de acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable.

En un proceso RCM, para identificar una falla, en primer lugar se identifican las circunstancias que llevaron a la falla. Luego se pregunta qué eventos pueden causar que el activo falle.

Una vez identificadas las fallas funcionales, se debe identificar todos los hechos que de manera razonablemente posible, pueden haber causado cada estado de falla. Estos hechos se conocen como **modos de falla** e incluyen aquellas fallas que han ocurrido en equipos iguales o similares operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por planes de mantenimiento utilizados y fallas que aún no han ocurrido pero que son altamente posibles de ocurrir en el contexto operacional. Por lo tanto, un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional y como mínimo debe contener en la descripción un sustantivo y un verbo.

RCM II HOJA DE INFORMACIÓN © 1998 ALADON LTD		SISTEMA <i>Sistema de Bombeo de Agua de Refrigeración</i>	
		SUB-SISTEMA	
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de Función)	MODO DE FALLA (Causa de la Falla)	
1 Transferir agua desde el Tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto	A Incapaz de transferir agua	1 Cojinetes agarrotados 2 Impulsor loco, suelto 3 Impulsor trabado por un cuerpo extraño 4 El cubo de acople falla por fatiga 5 Motor quemado 6 Válvula de ingreso trabada en posición cerrada 7 ...etc.	
	B Transfiere menos de 800 litros por minuto	1 Impulsor gastado 2 Línea de succión parcialmente bloqueada 3 ...etc.	

Figura 2.5: Ejemplo de función, falla funcional y modo de falla según Moubray. [1]

Categorías de modos de falla

Según Moubray [1], los modos de falla pueden ser divididos en tres grupos:

1. **Capacidad decreciente:** Esto ocurre cuando la capacidad inicialmente se encuentra por sobre el nivel de funcionamiento deseado, pero que luego al entrar

en funcionamiento, esta decae por debajo del funcionamiento deseado. Esto se puede originar por deterioro, fallas de lubricación, polvo o suciedad, desarme y errores humanos que reducen la capacidad.

2. **Aumento del funcionamiento deseado:** Ocurre cuando el funcionamiento deseado está por sobre la capacidad del activo físico posterior a la puesta en marcha. Esta categoría se puede dividir en las siguientes situaciones:

- El funcionamiento deseado aumente hasta que el activo no puede responder por él
- Aumente el esfuerzo del activo físico causando un deterioro acelerado hasta un punto en donde se torna muy poco confiable y por ende deja de ser útil.

Las razones para llegar a estos casos pueden ser: sobrecarga deliberada constante, sobrecarga no intencional constante, sobrecarga no intencional repentina y procesamiento o material de empaque incorrecto. Normalmente estos modos de falla ocurren por errores humanos (muchas veces involuntarios).

3. **Capacidad inicial:** Ocurre cuando el funcionamiento deseado sobrepasa la capacidad inicial desde la puesta en marcha. Esto usualmente afecta a solo algunas funciones del activo, sin embargo estos puntos débiles afectan la operación de toda la cadena.

Nivel de detalle de un modo de falla

Para tener una estrategia adecuada para el manejo de una falla, se debe tener un detalle suficiente de los modos de falla, sin embargo no siempre se requiere de tanto detalle, ya que se perdería demasiado tiempo en el análisis. Es por ello que *los modos de falla deben ser definidos con el detalle suficiente como para posibilitar la selección de una adecuada política de manejo de falla*. Para esto se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- **Causalidad:** Existe una relación directa entre el nivel de detalle y el número de modos de falla que se deben incluir en un análisis de modos y efectos de falla (FMEA). Aquí surge un concepto importante llamado causa-raíz, el cual se refiere a que si se ahonda lo suficiente, es posible llegar a un nivel causal final y absoluto, sin embargo es difícil llegar al nivel mínimo para un modo de falla ya que puede extenderse ilimitadamente. Por esto el nivel al que se debe identificar un modo de falla es aquel en donde se puede identificar la política apropiada para manejar la falla.
- **Probabilidad:** Cuando se listan los modos de falla, se debe considerar la probabilidad de ocurrencia, dejando de lado los poco probables. En detalle, se deben incluir las fallas que han ocurrido con anterioridad en el mismo activo o activos

similares y los modos de falla que ya están tratados en rutinas de mantenimiento proactivas. Además se debe incluir cualquier otro modo de falla que no haya ocurrido aún, pero que tenga posibilidades reales de suceder.

- **Consecuencias:** Cuando una consecuencia puede ser realmente severa, aunque la falla sea muy poco probable debe registrarse y ser analizada.
- **Causas vs Efecto:** Al momento de listar los modos de falla se debe tener cuidado de no confundir las causas con los efectos.
- **Modos de falla y contexto operacional:** El contexto operacional de un activo esta de la mano con los modos de falla en términos de causas, probabilidad y consecuencias.

2.4.3. Efectos de falla

Según Moubray [1], los efectos de falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla. Se debe notar que un efecto de falla no es lo mismo que una consecuencia de falla, ya que el primero responde a la pregunta *¿Qué ocurre?*, mientras que el segundo responde a la pregunta *¿Qué importancia tiene?*.

Para describir los efectos de falla se debe constar de los siguientes puntos:

- La evidencia de que se ha producido una falla .
- Las maneras en que la falla supone una amenaza para la seguridad y el medio ambiente.
- Las maneras en que afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos causados por la falla.
- Lo que debe hacerse para reparar la falla

Para describir los efectos de falla no deben ser considerados mantenimientos anteriores, ya que se busca describirlos como si no se estuviera haciendo nada para impedirlos.

2.5. Consecuencias de falla

Algunos modos de falla afectan al producto final en su calidad o en el servicio prestado, otros amenazan la seguridad o su entorno. Algunos incrementan los costos operacionales, el consumo de energía, o bien afectan múltiples áreas de una organización. Por otro lado existen algunos modos de falla que aparentemente no tienen efectos, sin embargo podrían exponer a una organización a un alto riesgo. De acuerdo a esto, si alguno de esos modos de fallas no son anticipados o prevenidos, el tiempo y esfuerzo que se requieren para corregirlos afectan significativamente a la organización, ya que

repararlos consume muchos recursos que podrían ser utilizados de mejor forma. La severidad de esos efectos gobiernan la forma en que cada modo de falla es tratado por una organización. El impacto en cada caso, depende del contexto operacional del activo, los estándares de rendimiento de acuerdo a cada función y los efectos físicos de cada modo de falla.

Cada modo de falla tiene un específico set de consecuencias asociadas a él. Si las consecuencias son muy serias, entonces se harán esfuerzos considerables para prevenir la falla, o al menos anticiparlas a tiempo para reducir o eliminar las consecuencias. Si un modo de falla posee consecuencias menores, es posible que no se realice alguna acción pro activa y por ende, simplemente se corregirá el modo de falla una vez que suceda. Con todo esto, según la norma SAE JA1012 [6], podemos decir que las consecuencias de falla son más importantes que sus características técnicas, lo que sugiere la idea de que **en la gestión de fallas es más importante prevenir o reducir las consecuencias de falla, más que anticipar o prevenir los modos de falla.**

Las consecuencias de falla se dividen en las siguientes categorías:

- Fallas ocultas y evidentes
- Consecuencias de seguridad, ambientales, operacionales y no operacionales

2.5.1. Fallas ocultas y evidentes

Una **falla oculta** es un modo de falla cuyos efectos no son evidentes para el equipo de operación en circunstancias normales de funcionamiento si el modo de falla ocurre por si mismo.

Una **falla evidente** corresponde a un modo de falla cuyos efectos son aparentes para el equipo de operación en circunstancias normales cuando el modo de falla ocurre por si mismo.

2.5.2. Consecuencias de seguridad, entorno, operacionales y no operacionales

Consecuencias de seguridad

Una falla tiene consecuencias de seguridad si existe una probabilidad intolerable de que pueda matar o herir a un ser humano.

Consecuencias ambientales

Una falla tiene consecuencias ambientales si existe una probabilidad intolerable de que pueda infringir cualquier norma ambiental conocida.

Consecuencias operacionales

La función primaria de la mayoría de los equipos en las industrias es generar ingresos. La magnitud de estas ganancias dependen de la cantidad de equipos utilizados y su disponibilidad. En caso de una falla, los efectos de ella a menudo son mucho mayores que el costo de reparar las fallas, por lo cual debe tenerse en cuenta dichos costos y evaluar la rentabilidad de cualquier política de gestión de fallas. En general, los fallos afectan a las operaciones de cuatro formas:

- Afectan la producción total o el rendimiento
- Afectan la calidad del producto
- Afectan el servicio al cliente (y pueden incurrir en multas financieras)
- Incrementan los costos operacionales además del costo directo de reparación.

Consecuencias no operacionales

Las consecuencias de una falla evidente que no tiene un efecto adverso directo en la seguridad, el medio ambiente o la capacidad operativa se clasifican como no operativas. Las únicas consecuencias asociadas a estas fallas son el costo directo de reparar la falla en sí y cualquier daño secundario, por lo que estas consecuencias también son económicas.

2.6. Criticidad de sistemas

De acuerdo a la norma NCh-ISO 31010 [4], para analizar la criticidad de un sistema se necesita conocer el riesgo asociado, es por ello que se requieren técnicas de la gestión del riesgo, las cuales ayudan a la toma de decisiones considerando la incertidumbre, la posibilidad de futuros eventos y sus efectos.

Algunos de los beneficios que trae realizar una evaluación del riesgo son los siguientes:

- Comprender el riesgo y su impacto potencial sobre los objetivos
- Proporcionar información a quienes toman decisiones
- Identificar los factores principales que contribuyen a los riesgos y los puntos débiles en sistemas u organizaciones
- Comunicar los riesgos y las incertidumbres
- Ayudar a establecer prioridades
- Proporcionar información que ayudará a evaluar si se debería aceptar el riesgo cuando se compara con criterios predefinidos

2.6.1. Análisis del riesgo

Para poder construir un FMECA, se requiere saber la criticidad de cada modo de falla. Para ello, una herramienta muy útil es realizar un análisis del riesgo, el cual considera las causas, fuentes y consecuencias del riesgo, además de la probabilidad de que estas ocurran. Para ello, se deben identificar los factores que afectan a las consecuencias y a la probabilidad.

Existen métodos de análisis cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos definen consecuencias, probabilidad y nivel de riesgo, indicando niveles como alto, medio y bajo. Los métodos semicuantitativos utilizan escalas de evaluación numéricas para las consecuencias y la probabilidad, y las combinan para determinar un nivel de riesgo aplicando una fórmula. El análisis cuantitativo estima valores realistas para las consecuencias y sus probabilidades, y obtiene valores del nivel de riesgo en unidades específicas definidas cuando se desarrolla el contexto.

Existen muchas técnicas de análisis, sin embargo una técnica muy útil para implementarla en un FMECA es la utilización del número de prioridad del riesgo (RPN).

Número de prioridad del riesgo

De acuerdo a lo expuesto por la norma ISO 31010 [4], el RPN es una medida semicuantitativa de la criticidad, que se obtiene multiplicando números de las escalas de clasificación (normalmente entre 1 y 10) por la consecuencia de la falla, la probabilidad de la falla y la aptitud para detectar el problema (A una falla se le da una prioridad más alta si es difícil de detectar).

Según la norma IEC 60812 [7], para determinar el RPN, se tiene la siguiente ecuación:

$$RPN = S \cdot O \cdot D \quad (2.1)$$

Donde los términos de la ecuación 2.1 corresponden a:

- *S*: es un número adimensional que denota severidad, es decir, es una estimación de cuanto afectarían los efectos de una falla al sistema o al usuario.
- *O*: este número adimensional denota la probabilidad de ocurrencia de un modo de falla para un determinado periodo de tiempo. También puede definirse como un número de clasificación de ocurrencia.
- *D*: este número significa detectabilidad, es decir, una estimación de la chance de identificar y eliminar la falla antes que el sistema sea afectado. Usualmente este número se clasifica en orden inverso de acuerdo al rango de valores utilizados en la severidad *S* y ocurrencia *O*. Cuanto más alto es el número de detección, menos probable es la detección, la menor probabilidad de detección conduce a un RPN más alto y a una mayor prioridad para la resolución del modo de falla.

Por otro lado, cuando se tienen casos con RPN similares o idénticos, se deben abordar con prioridad los modos de falla que poseen más alta severidad.

Escalas de ranking para un FMECA

Los tipos de escalas más utilizadas según la norma SAE J1739 [8] se presentan para cada índice del RPN:

Severidad	Criterio	Ranking
Ninguna	Sin efectos	1
Muy menor	Perturbación menor en la línea productiva. Se presentan desajustes y pequeñas vibraciones en el ítem que no están en conformidad. Defecto notado por la minoría de los clientes (menor al 25%).	2
Menor	Perturbación menor en la línea productiva. Se presentan desajustes y chirridos que no están en conformidad. Defecto notado por el 50% de los clientes.	3
Muy baja	Perturbación menor en la línea productiva. Ajustes, terminaciones y sonidos en el ítem no están en conformidad. Defecto notado por la mayoría de los clientes (mayor al 75%).	4
Baja	Equipo operable, pero con algunos ítems de confort con un nivel de calidad reducido. El cliente experimenta algo de insatisfacción.	5
Moderada	Equipo operable, pero con algunos ítems de confort inoperables. El cliente experimenta insatisfacción.	6
Alta	Equipo operable, pero con un nivel de rendimiento reducido. Cliente muy insatisfecho.	7
Muy alta	Perturbación grave a la línea productiva. Equipo inoperable, pérdida de la función primaria.	8
Peligroso con advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad cuando el modo de falla afecta la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla se advierte al ocurrir.	9
Peligroso sin advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario. Muy alto ranking de severidad cuando el modo de falla afecta la seguridad operativa y/o envuelve el no cumplimiento de regulaciones gubernamentales. La falla no se advierte al ocurrir.	10

Tabla 2.1: Escala de severidad (S) de acuerdo a la norma J SAE 1739 [8].

Ocurrencia del modo de falla	Posible tasa de falla	Ranking
Remota: La falla es poco probable, no se repiten las fallas de procesos casi idénticos.	≤ 1 en 1.500.000	1
Muy baja: solo fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos.	1 en 150.000	2
Bajas: Fallas aisladas asociadas con procesos similares.	1 en 15.000	3
Moderada: Generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos que experimentan fallas ocasionales, pero no en mayores	1 en 2.000	4
	1 en 400	5
	1 en 80	6
Alta: Generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos, que presentan	1 en 20	7
	1 en 80	8
Muy alta: La falla es casi inevitable.	1 en 3	9
	≤ 1 en 2	10

Tabla 2.2: Escala de ocurrencia (O) de acuerdo a la norma J SAE 1739 [8].

Detección	Criterios: Probabilidad de detección de un modo de falla	Ranking
Casi cierta	Los actuales controles son casi certeros para detectar el modo de falla. Detección confiable.	1
Muy alta	Muy alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	2
Alta	Alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	3
Moderadamente alta	Moderadamente alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	4
Moderadamente alta	Moderada probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	5
Baja	Baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	6
Muy baja	Muy baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	7
Remota	Remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	8
Muy remota	Muy remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla.	9
Casi imposible	No existen controles disponibles para detectar el modo de falla	10

Tabla 2.3: Escala de detectabilidad (D) de acuerdo a la norma J SAE 1739 [8]..

Evaluación del riesgo

Según la norma IEC 60812 [7], hay ocasiones en que al calcular un RPN entre distintos modos de falla con severidades distintas, se obtiene un valor no representativo en el sentido de la concordancia con la severidad. A modo de ejemplo, al tener un modo de falla con índices S,O,D igual a 10,3,2 se obtiene un $RPN_1=60$; por otro lado al tener otro modo de falla con índices S,O,D igual a 5,5,5, se obtiene un $RPN_2=125$. Según estos valores el modo de falla más crítico corresponde al RPN_2 , sin embargo la severidad del RPN_1 es muy superior y crítica, por lo cual no es representativo. En estos casos, sobre todo con índices de severidad (S) superiores (9,10), debe prevalecer por sobre el RPN.

2.7. Estrategia de mantenimiento

Una vez completado el proceso del análisis FMECA, se requiere buscar la mejor estrategia de mantenimiento de acuerdo al diagrama de decisión RCM (ver anexo figura 2.10). Para ello se requiere conocer que tipos de alternativas se pueden presentar de acuerdo a las características de un modo de falla. Estas alternativas se dividen en dos tipos: Tareas preventivas y acciones a falta de.

2.7.1. Tareas preventivas

Según Moubray [1], estas tareas se llevan a cabo antes que ocurra una falla con el objetivo de prevenir que el componente llegue a un estado de falla. Abarcan lo que

comúnmente se denomina mantenimiento “predictivo” y “preventivo”, aunque RCM utiliza los términos *reacondicionamiento cíclico*, *sustitución cíclica* y *mantenimiento a condición*.

Reacondicionamiento y sustitución cíclico

Moubray señala que el **reacondicionamiento cíclico** consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, independiente de su condición en ese momento.

Las tareas de **sustitución cíclica** consisten en descartar un elemento o componente antes, o en el límite de edad definida, independiente de su condición en ese momento.

Con respecto a la frecuencia de las tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclica, están determinadas por la edad en la que el elemento o componente muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.

Para que las tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclico sean factibles, se requiere:

- Reacondicionamiento cíclico
 1. Existencia de una edad identificable en donde se tenga un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.
 2. La mayoría de los elementos deben sobrevivir a esta edad, ya que si fallan antes de llegar a ella, el resultado neto sería un aumento de las fallas imprevistas.
 3. Se pueda restaurar la resistencia original a la falla del activo físico, o que se aproxime a la condición original para asegurar que el elemento continúe siendo capaz de cumplir la función deseada por un periodo de tiempo razonable.
- Sustitución cíclica: Se deben cumplir los puntos 1 y 2 del reacondicionamiento cíclico. Además, no es necesario preguntar si la tarea restaurará la resistencia original, ya que se reemplazará por un elemento nuevo.

Mantenimiento a condición

De acuerdo a la norma SAE JA1012 [6], este mantenimiento se basa en que muchos modos de falla son independientes de la edad y presentan síntomas de que están en un proceso de falla. Para determinar que sucede en las etapas finales de falla se utilizan los **intervalos P-F**, ya que muestran el comienzo de una falla, pasando por el punto que puede ser detectada (P: Potential Failure o Falla Potencial) para luego (en caso de no

ser detectada o corregida) continuar deteriorándose hasta llegar aceleradamente al punto de falla funcional (F: Functional Failure o Falla Funcional) (ver figura 2.6). Por lo tanto, una falla potencial, es un estado identificable que indica que una falla funcional está a punto o en proceso de ocurrir. La falla funcional, es el punto en que el activo deja de cumplir sus funciones.

Las tareas designadas para detectar fallas potenciales se conocen como *tareas a condición*, y su finalidad es poder actuar para prevenir una falla funcional y evitar sus consecuencias.

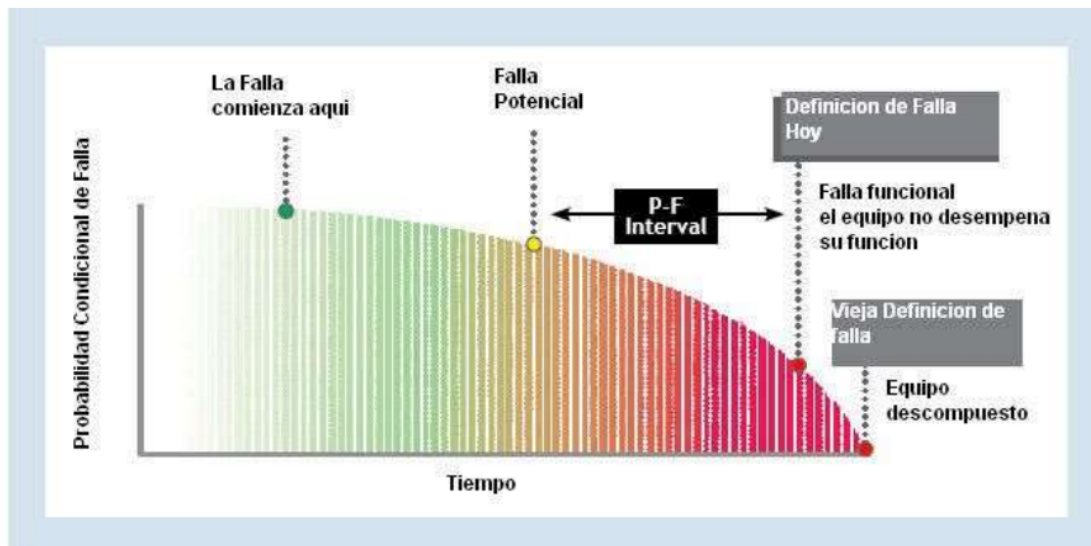


Figura 2.6: Intervalo P-F de acuerdo a la norma SAE JA1012 [6].

Si queremos detectar la falla potencial antes de que se convierta en falla funcional, el intervalo entre las revisiones debe ser menor al intervalo P-F. Este intervalo puede ser medido en cualquier unidad que entregue indicaciones de la exposición al esfuerzo (tiempo de funcionamiento, unidades de producción, ciclos parada-arranque, entre otros). En el caso de que si se realizan tareas a condición a intervalos más largos que el intervalo P-F, existe una posibilidad de que pasemos totalmente por alto la falla. Por contraparte, si utilizamos intervalos muy pequeños se desperdiciarán recursos en el proceso de chequeo.

Con respecto a la factibilidad de aplicación de las tareas a condición, son técnicamente factibles si:

- Es posible definir la condición clara de falla potencial
- El intervalo P-F es razonablemente consistente
- Monitorear los activos a un intervalo menor al intervalo P-F

Algunas técnicas de monitoreo de condición se presentan a continuación:

- Monitoreo dinámico, el cual analiza la energía en los activos. Esta técnica comprende: análisis de vibraciones, análisis ultrasónico, análisis de proximidad, emisión acústica, entre otros.
- Monitoreo de partículas, en fluidos utilizados en los activos. Comprende análisis de ferrografía, conteo de partículas, sensores ferromagnéticos, entre otros.
- Monitoreo Químico, son utilizadas para detectar metales de desgaste, pérdidas y corrosión. Algunas técnicas son espectroscopía, monitoreo de corrosión electroquímica, análisis de emisión de escapes, entre otros.
- Monitoreo de efectos físicos, utilizados para verificar el estado físico de un activo. Entre sus técnicas tenemos: tintas penetrantes, ultrasonidos, ensayos de corrientes parásitas, radiografías de rayos x, color y olor de aceite, strain gauges, monitoreo de viscosidad, entre otras.
- Monitoreo Térmico, utilizados para verificar la temperatura del activo. Entre sus técnicas tenemos termografía de radiación, escaners infrarrojos, pintura termosensible.
- Monitoreo Eléctrico, utilizados para distintas aplicaciones. Entre sus técnicas, tenemos la resistencia de polarización lineal (corroedor), resistencia eléctrica (corrosión), monitoreo de potencial, monitoreo de factor de potencia, entre otros.

2.7.2. Acciones a falta de

Estas tratan con el estado de falla y son elegidas cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva. Las acciones a falta de incluyen *búsqueda de fallas, rediseño y mantenimiento correctivo*.

Búsqueda de fallas

Son tareas diseñadas para chequear si algo todavía funciona. También se conocen como chequeos funcionales. Esta búsqueda de fallas se aplica sólo a las fallas ocultas o no reveladas, además, las fallas ocultas sólo afectan a los dispositivos de protección.

Las tareas cíclicas de búsqueda de falla, consisten en chequear una función oculta a intervalos regulares para ver si ha fallado.

Algunos aspectos técnicos que se deben considerar para realizar estas tareas son los siguientes:

- Chequear el sistema de protección completo
- Siempre debemos buscar formas de chequear las funciones de dispositivos de seguridad sin desconectarlos o perturbarlos de ninguna manera

- Debe ser físicamente posible chequear la función
- La frecuencia de inspección debe ser práctica, es decir, el intervalo de inspección debe ser determinado en base a las variables de disponibilidad y confiabilidad.

Para que una técnica de búsqueda de fallas sea factible, debe ser posible de realizar y además no debe incrementar el riesgo de una falla múltiple, es decir, debe reducir la probabilidad de falla múltiple asociada a un nivel tolerable.

Rediseño

Según Moubray [1], ante una falla oculta, si no se encuentra una solución con la búsqueda de fallas, se utiliza el rediseño cuando esta falla tiene consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente. Esto también se aplica cuando se tiene una falla evidente con consecuencias para la seguridad o el medio ambiente y no se encuentra una tarea proactiva apropiada.

El rediseño se refiere a cualquier cambio en la especificación de un componente, la implementación de un elemento nuevo, la sustitución de un activo completo o cambiar la ubicación de un activo.

Para que el rediseño sea válido se deben cumplir lo siguiente:

- Reducir la probabilidad de que ocurre el modo de falla a un nivel que sea tolerable
- Cambiar el componente o el proceso de tal manera que la falla deje de tener consecuencias para la seguridad o el medio ambiente

Ningún mantenimiento programado

El mantenimiento es correctivo si una falla es evidente u oculta, y no afecta la seguridad ni el medio ambiente, se puede no realizar ningún mantenimiento programado, es decir, los activos son dejados en servicio hasta que ocurra una falla funcional y se aplica una medida correctiva para repararlos o reemplazarlos. Por otro lado, este tipo de mantenimiento se da a lugar cuando el costo de la falla es menor que el costo de implementar una tarea proactiva.

2.8. Proceso RCM

Para implementar la estrategia RCM se requiere de una serie de pasos, los cuales se muestran en la figura 2.7. De esta figura se aprecia que en primer lugar se realiza un análisis FMEA, el cual va acompañado de un análisis de criticidad (mediante el uso del RPN). Si juntamos estos dos análisis podemos obtener el análisis completo FMECA. Estos datos recopilados del FMECA se ingresan a la hoja de información RCM (ver figura 2.8). Luego mediante el diagrama de decisión RCM se elige la mejor

alternativa para cada modo de falla descrito en el análisis anterior y se registra en la hoja de decisión RCM (ver figura 2.9).

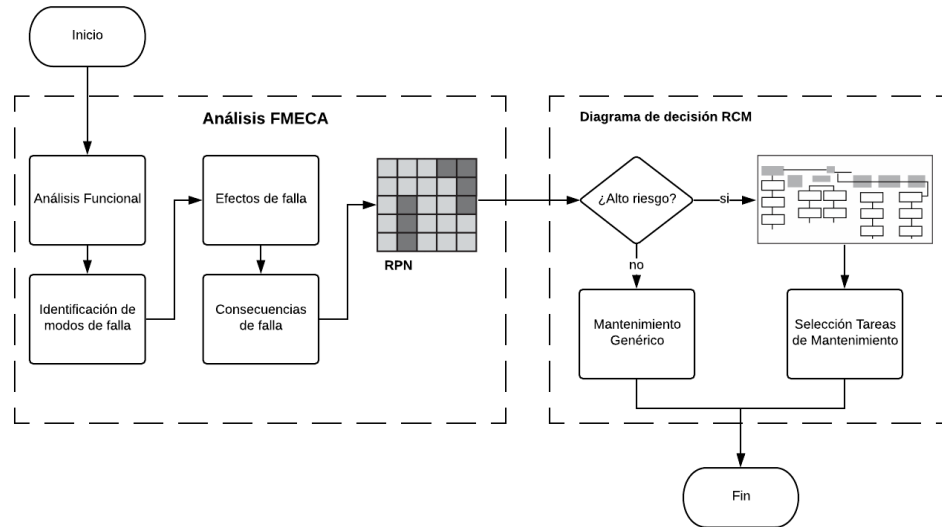


Figura 2.7: Proceso RCM en base a artículo FMECA de Aguilar - Torres - Magaña [11].

2.8.1. Hoja de información

La hoja de información registra todo el análisis FMEA considerando un análisis por criticidad de acuerdo al RPN. Por lo tanto, la figura 2.8 requiere añadir algunas columnas. El efecto de falla, se cuantifica con el índice de severidad (S), además, se deben agregar las columnas de “Causas de falla” y “Control de detección”, las cuales se representan por el índice de ocurrencia (O) y detectabilidad (D) respectivamente. Estos índices entregarán el valor de criticidad faltante para el completo análisis FMECA.

RCM II HOJA DE INFORMACIÓN © 1998 ALADON LTD		SISTEMA <i>Sistema de Bombeo de Agua de Refrigeración</i>	
		SUB-SISTEMA	
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de Función)	MODO DE FALLA (Causa de la Falla)	
1	Transferir agua desde el Tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto	A	Incapaz de transferir agua
			1 Cojinetes agarrotados 2 Impulsor loco, suelto 3 Impulsor trabado por un cuerpo extraño 4 El cubo de acople falla por fatiga 5 Motor quemado 6 Válvula de ingreso trabada en posición cerrada 7 ...etc.
		B	Transfiere menos de 800 litros por minuto
			1 Impulsor gastado 2 Línea de succión parcialmente bloqueada 3 ...etc.

Figura 2.8: Hoja de información propuesta por Moubray utilizando un ejemplo para un FMEA [1].

2.8.2. Hoja de decisión

Si miramos la figura 2.9, la hoja de decisión posee columnas con distintas nomenclaturas. En primer lugar tenemos el ítem de “Referencia de información”, que como su nombre lo indica, hace referencia al modo de falla a analizar. La letra **F** representa el número indicador de función, la sigla **FF** representa al indicador de falla funcional y la sigla **FM** representa al indicador del modo de falla.

Posteriormente tenemos el ítem de “Evaluación de consecuencias”, donde tenemos las letras **H, S, E, O** y **N**. Estas letras representan las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla de acuerdo al diagrama de decisión RCM de la figura 2.10. Se destaca que desde este ítem las respuestas a las preguntas serán S (si) o N (no).

Las 3 columnas siguientes registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea. La columna **H1/S1/O1/N1** es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias. La columna **H2/S2/O2/N2** es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento programado apropiada para prevenir las fallas. La columna **H3/S3/O3/N3** es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir fallas.

En el caso de que sea necesario responder a cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas encabezadas con **H4, H5, S4** son las que permiten registrar esas respuestas. Estas preguntas solo se responden si las respuestas a las tareas proactivas han sido “no”. Las respuestas de estas columnas se basan en las siguientes preguntas:

- H4: ¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de búsqueda de falla?
- H5: ¿Podría la falla múltiple afectar la seguridad o el medio ambiente?
- S4: ¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una combinación de tareas?
- En el caso de que las respuestas anteriores hayan sido N (no), las consecuencias de la falla son puramente económicas y no se pudo encontrar una tarea proactiva apropiada, por lo cual la decisión es no realizar mantenimiento programado, sin embargo el rediseño puede ser deseable.

Las últimas 3 columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con que debe hacerse y quien ha sido seleccionado para realizarla.

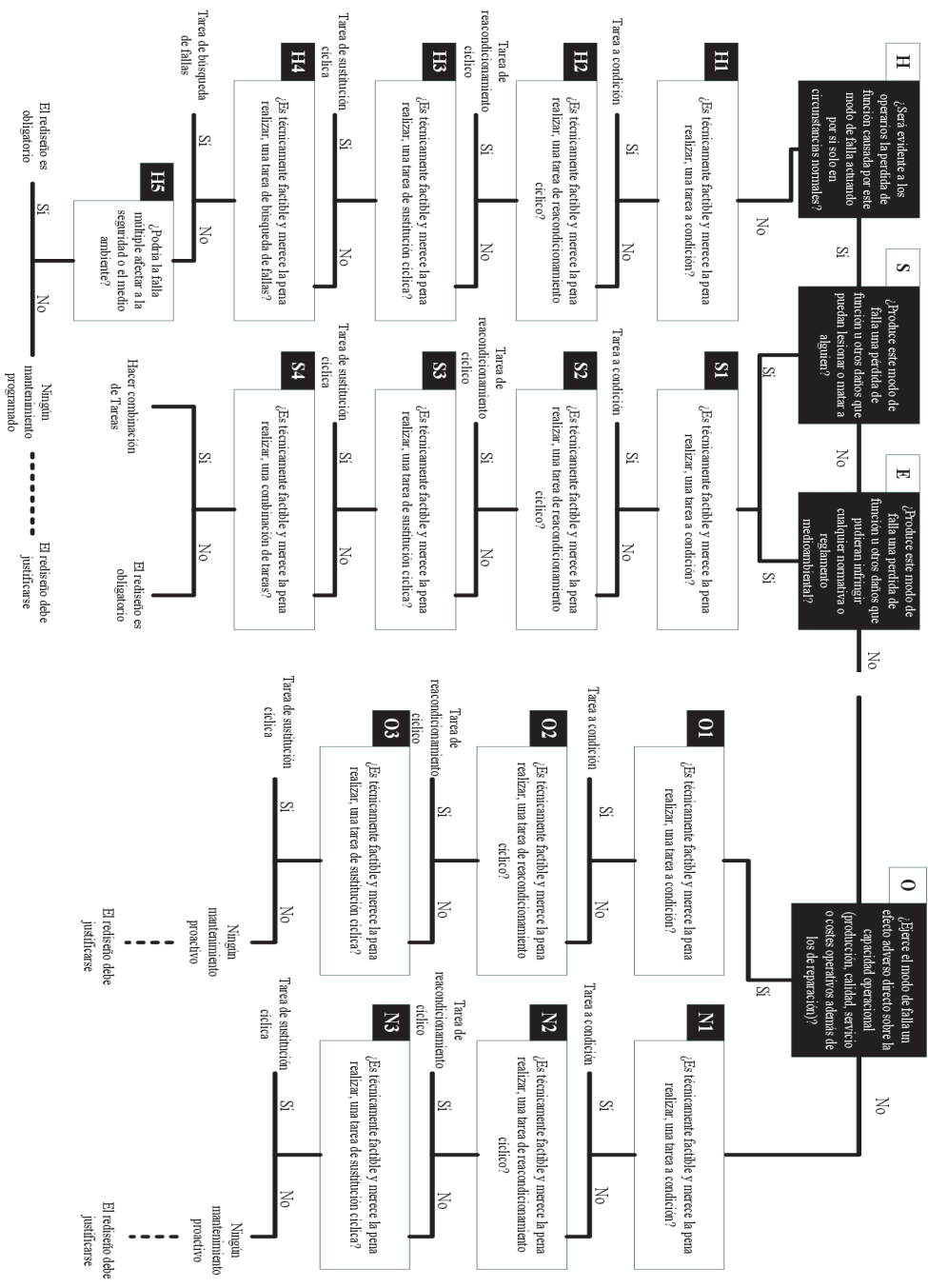


Figura 2.10: Diagrama de decisión RCM II propuesto por Moubray [1].

2.9. Conceptos útiles de mantenimiento

Para el mejor entendimiento del mundo del mantenimiento, se muestran algunos conceptos muy importantes a la hora de realizar un plan de mantenimiento según lo expuesto por Meruane [2].

2.9.1. Mantenibilidad

La mantenibilidad se define como *la probabilidad de que se restaure la funcionalidad de un componente con falla en un periodo de tiempo cuando las reparaciones son realizadas de acuerdo a un procedimiento descrito*, en otras palabras, es la probabilidad de reparar un componente en un tiempo determinado.

2.9.2. Confiabilidad

La confiabilidad (R) es *la probabilidad de que un componente cumpla con los requisitos de funcionalidad bajo ciertas condiciones para un intervalo de tiempo*. Si consideramos un grupo de N componentes idénticos y nuevos en $t = 0$, además $n(t)$ como el número de componentes que no han fallado en el intervalo $[0, t]$, la confiabilidad puede ser estimada como:

$$R(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (2.2)$$

2.9.3. Probabilidad acumulada de fallas

La probabilidad acumulada de fallas $F(t)$ se define como la probabilidad de que un componente falle en el intervalo $[0, t]$. Esto se puede expresar como:

$$F(t) = \frac{N - n(t)}{N} = 1 - R(t) \quad (2.3)$$

Además, la función de **densidad de probabilidad de fallas** $f(t)$, se define como *la probabilidad instantánea que un componente falle en t* , lo cual se expresa de la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.4)$$

2.9.4. Tasa de falla

La tasa de falla $\lambda(t)$ se define como *el número de fallas por unidad de tiempo*. Si consideramos un grupo de N componentes, en un intervalo de tiempo t , se han producido k fallas. Para determinar el valor de una tasa de falla, se requiere conocer verídicamente el valor de N . Para estimar una tasa de falla se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\hat{\lambda} = \frac{k}{N \cdot t} \quad (2.5)$$

2.9.5. Tiempo medio para fallar MTTF

Para un tiempo determinado de vida, el MTTF se define como la razón entre el tiempo total acumulado ($T = N \cdot t$) y el número de fallas (k), es decir:

$$MTTF = \frac{T}{k} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.6)$$

En el caso de que se tenga la función $f(t)$, el MTTF viene dado por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (2.7)$$

La ecuación 2.7 representa la probabilidad de que un componente que no falló en el intervalo $[0, t]$ falle en un intervalo $[t, t + dt]$

2.9.6. Tiempo medio entre fallas MTBF

Según Stegmaier [3], el tiempo medio entre fallas es el intervalo de tiempo en el que un elemento entra (o vuelve a entrar) en servicio (una vez finalizado el mantenimiento) excluyendo el intervalo de tiempo necesario para el mantenimiento. Esto se aprecia en la figura 2.11.

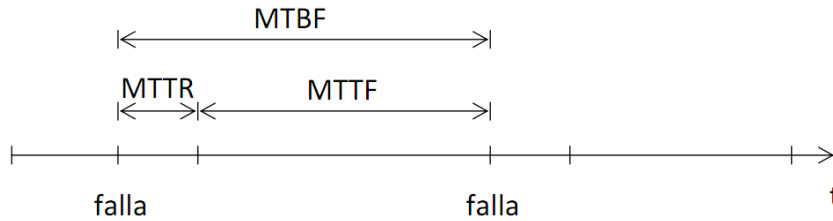


Figura 2.11: Tiempo medio entre fallas [2].

De esta figura se desprende la siguiente ecuación:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2.8)$$

Sin embargo, normalmente ocurre que el tiempo medio para reparar una falla es mucho menor que el tiempo medio para fallar, por lo cual podemos hacer la siguiente aproximación:

$$MTTR \ll MTTF$$

Con lo que tenemos:

$$MTBF \approx MTTF$$

Se debe considerar que el MTTR (tiempo medio para reparar) depende del diseño, herramientas disponibles, destreza y capacitación del personal. Además depende del tiempo medio de espera (MWT) que corresponde al tiempo que demora la administración en detectar una falla.

2.9.7. Relaciones útiles

Según lo expuesto por Meruane [2], la confiabilidad se puede expresar de la siguiente forma:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.9)$$

Si consideramos que la tasa de falla es constante, es decir, $\lambda(t) = \lambda$, podemos despejar la integral de la ecuación 2.9 resultando lo siguiente:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

Además, de acuerdo a las aproximaciones realizadas por Meruane, podemos escribir:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt \quad (2.11)$$

Y nuevamente, utilizando una tasa de falla constante, podemos expresar que:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \approx MTBF \quad (2.12)$$

2.9.8. Disponibilidad

Meruane [2] señala que la disponibilidad (A) es *un parámetro que describe el tiempo total que un componente está disponible*. Esta dado por la confiabilidad y mantenibilidad de un componente. Esto se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{TD}{TT} = \frac{TD}{TND + TD} = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF} \quad (2.13)$$

Donde TD es el tiempo disponible, TND es el tiempo no disponible y TT es el tiempo total.

2.10. Conceptos hidráulicos

En esta sección se explicarán algunos conceptos hidráulicos de utilidad que se usarán en el análisis funcional del banco de pruebas.

2.10.1. Circuitos

Para el accionamiento de motores, actuadores, o lo que se requiera de presión y caudal de fluido hidráulico, se requiere de una bomba que genere las condiciones necesarias para el requerimiento de un equipo, por lo cual existen dos lógicas de conexión grandes para ello, como lo son los circuitos abiertos y cerrados.

Circuito abierto

De acuerdo a lo expuesto por el manual de la empresa Rexroth [9], un circuito abierto corresponde a la situación en donde la tubería de aspiración de una bomba, conduce por debajo del nivel de un fluido, cuya superficie se encuentra unida en forma abierta con la presión atmosférica. El fluido hidráulico es conducido a través de válvulas direccionales hacia el consumidor y también de regreso al tanque. Esto se puede ver en la figura 2.12.

Circuito cerrado

Un circuito cerrado corresponde a un sistema hidráulico en donde el fluido hidráulico que retorna del consumidor es conducido nuevamente a la bomba. Esto se puede apreciar en la figura 2.13.

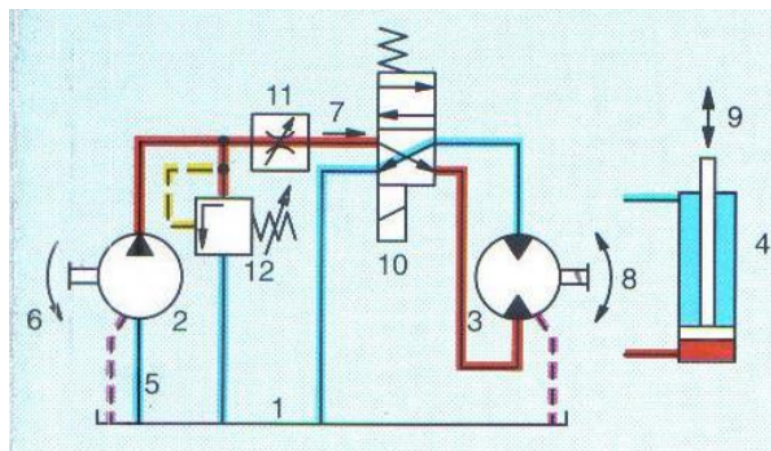


Figura 2.12: Ejemplo de un circuito abierto. Notar que en (5) la tubería de aspiración se alimenta directamente de tanque, para luego dirigir el flujo a través de una válvula direccional (10) hacia la entrada, y posterior la salida hacia tanque. [9]

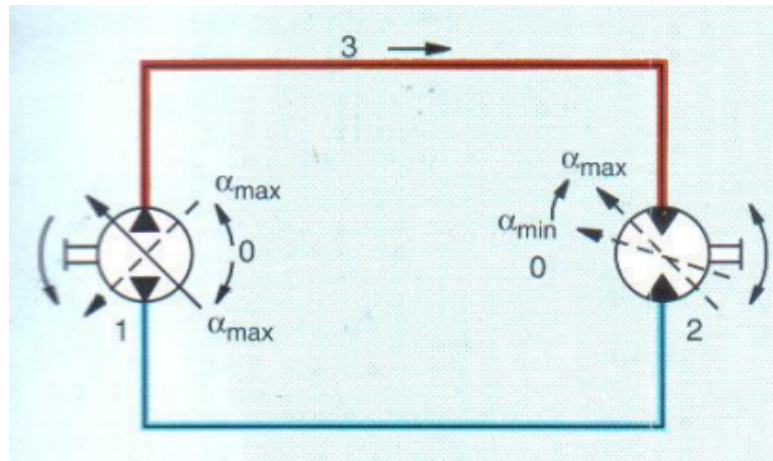


Figura 2.13: Ejemplo de un circuito cerrado. Se aprecia que la alimentación de la bomba viene del consumidor. [9]

2.11. Modelo de costos para el plan de mantenimiento

A continuación se presenta el modelo de costos utilizado para las intervenciones de mantenimiento propuestas.

2.11.1. Costos de intervenciones por mantenimiento

Según Meruane [2], el costo de intervenciones de mantenimiento se puede segregar de acuerdo al tipo de mantenimiento a realizar, entre los cuales tenemos:

- Costos de intervención preventiva (C_p)
- Costos de intervención correctiva (C_c)

Costos de intervención preventiva

Las intervenciones preventivas son programadas, por lo tanto no afecta a la producción, por lo que un costo por fallas no está asociado directamente. Además, incluye los siguientes costos de intervención:

- Mano de obra interna o externa
- Repuestos de bodega o comprados para una intervención
- Insumos requeridos para la intervención

La **mano de obra (MO)** considera un tiempo de intervención y un costo de horas hombre por unidad de tiempo utilizado. Esto se puede describir de la siguiente forma:

$$MO = T_i \cdot HH \quad (2.14)$$

Donde $T_{i,p}$ corresponde al tiempo de la intervención en horas y HH corresponde a la tarifa de la hora hombre utilizada en pesos por horas (\$/h). Los **repuestos preventivos** ($C_{rep,p}$) consideran el precio actual de cada componente utilizado en pesos.

Los **insumos (I)** se calculan como un valor unitario determinado por la empresa, el que se multiplica de acuerdo a la cantidad necesaria por la intervención (depende netamente del componente).

Además, los costos preventivos consideran la **frecuencia de intervención (F)** planificada anualmente.

Todo esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$C_{prev} = (HH \cdot T_{tarea} + C_{rep,p} + I) \cdot F \cdot n \quad (2.15)$$

Cabe destacar que el índice n se utiliza cuando un componente posee internamente un conjunto de subcomponentes idénticos, y representa la cantidad de dichos subcomponentes.

Costos de intervención correctiva

Los costos correctivos (C_{corr}) son muy similares en forma a los costos preventivos, sin embargo se diferencian por la inclusión del costo de la falla.

El costo de falla (C_{falla}) comprende el costo de ineficiencia (C_{inef}) debido a la detención imprevista en conjunto con el tiempo de ineficiencia (T_{inef}), tal como se muestra a continuación:

$$C_{falla} = C_{inef} \cdot T_{inef} \quad (2.16)$$

Donde C_{inef} es un dato entregado por la empresa medido en [\$/h] y el T_{inef} se mide en horas.

Finalmente el costo correctivo se expresa de la siguiente forma:

$$C_{corr} = (HH \cdot T_{i,c} + C_{inef} \cdot T_{inef} + C_{rep,c} + I) \cdot n \quad (2.17)$$

Se destaca que no se considera la frecuencia de inspección (F) ya que al ser correctivo no se tiene alguna planificación de mantenimiento.

2.12. Metodología para planes de acción: 5W-1H

Para generar un plan de acción, se utiliza la herramienta 5W-1H. Según el artículo “Las 5W + H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos” [13], esta sigla significa:

- What?: ¿Qué se quiere mejorar?
- Why?: ¿Por qué se quiere mejorar?
- When?: ¿Cuándo se quiere mejorar?
- Where?: ¿Dónde se va a mejorar?
- Who?: ¿Quién lo va a mejorar?
- How?: ¿Cómo lo va a mejorar?

Estas interrogantes responden a la etapa de planificación del ciclo PDCA².

Cada ítem de este método nos entrega la información esencial para realizar el plan de acción y se puede dividir en los factores que se verán a continuación:

- ¿Qué?:
 1. Factor crítico de éxito: Corresponde a cual es el fin principal de implementar este plan de acción.
 2. Proceso de definición de estrategias de ejecución para el plan de acción: Divide en estrategias el ítem anterior, señalando como se puede lograr el factor crítico del éxito con acciones puntuales.
- ¿Por qué?:
 1. Problemática: Explica el problema en cuestión a raíz de la pregunta ¿Qué?.
 2. Metas: Explica que es lo que se espera obtener a raíz de la problemática.
- ¿Cuándo?:
 1. Plazo: Señala el plazo de la ejecución del plan de acción.
- ¿Dónde?:
 1. Ubicación: Donde geográficamente se quiere implementar el plan.
- ¿Quién?:

²PDCA: Plan (P), Do (D), Check (C), Act (A), lo que significa planificar las actividades a llevar a cabo, ejecutar estas actividades, comparar lo realizado con lo planificado y finalmente aplicar las acciones de mejora (respectivamente). Fuente: Artículo: Las 5W + H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos [13].

1. Responsable: Señala quién es el encargado de ejecutar el plan.

■ ¿Como?:

1. Actividades: Explica como se va a realizar la ejecución (de manera simplificada) el plan de acción.
2. Mecanismo de seguimiento: Señala como se va a tener control de las actividades propuestas.
3. Barreras a superar: Explica cuales son las posibles trabas que pueda tener la ejecución correcta del plan de acción.
4. Resultado esperado: Explica que es lo que se espera a raíz de la ejecución total del plan de acción.

Capítulo 3

Análisis Funcional

En este capítulo se explicará el funcionamiento del banco de pruebas y sus modos de operar de acuerdo a los sistemas que posee.

3.1. Breve reseña del banco de pruebas

El banco de pruebas posee una serie de componentes, sin embargo estos se dividen de acuerdo a los modos de prueba que se pueden realizar en el banco. Además de sus componentes, una sala posterior en donde se encuentra el motor diésel que le entrega energía mecánica a dos bombas de pistones, además de dos motores eléctricos que le entregan energía mecánica a otras bombas del sistema. A continuación se muestran algunas imágenes del banco de prueba en sus zonas frontal (figura 3.1) y trasera (figura 3.2). Además, en la figura 3.3 se muestra un dibujo del banco desde el frente que será utilizado como base para el levantamiento hidráulico.



Figura 3.1: Banco de pruebas vista frontal.



Figura 3.2: Banco de pruebas vista trasera.

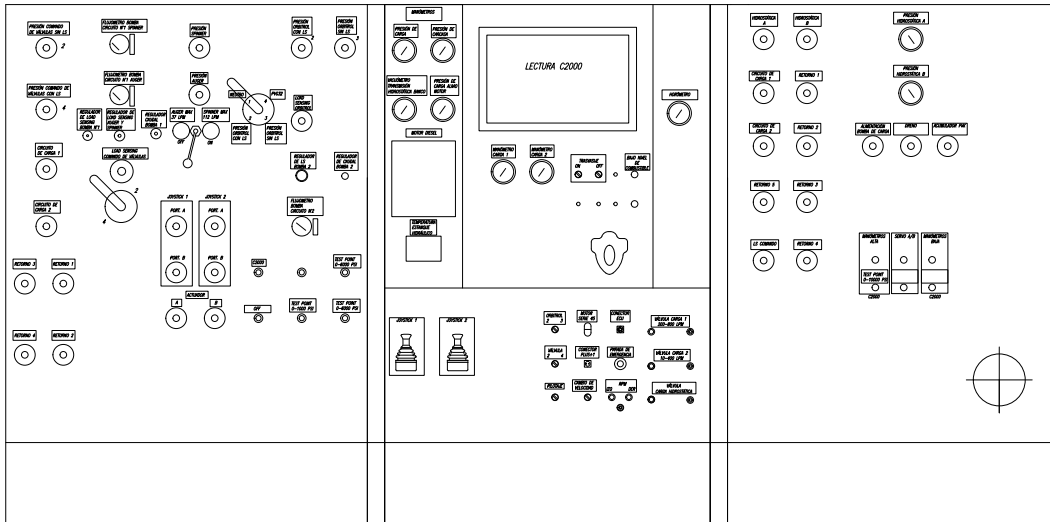


Figura 3.3: Vista frontal CAD. (Fuente: elaboración propia)

3.2. Tipos de pruebas

El banco de pruebas está facultado para realizar pruebas de distintos componentes hidráulicos. Para ello, existen protocolos de prueba por tipo de componente, entre los cuales tenemos:

1. Prueba de bombas (pistones, paletas, engranajes, tornillo)
2. Prueba de motores (pistones, paletas, engranajes, tornillo, orbital)
3. Prueba de comandos de válvulas
4. Prueba de orbitroles
5. Prueba de divisores de flujo
6. Prueba de unidades toma fuerza (PTO)
7. Prueba de cilindros hidráulicos

3.3. Descripción de sistemas

Tal como se mencionó, el banco de pruebas se analizará como sistemas por tipos de prueba, ya que realizando un global de componentes no se tiene una lógica funcional adecuada. Para ello, se realiza un levantamiento de la estructura técnica de objeto del banco de pruebas.

3.3.1. Sistema de prueba para bombas, divisores de flujo y toma fuerza (Sistema n°1)

El sistema de prueba de bombas se aprecia en la figura del anexo B.2. Este sistema es casi en su totalidad para realizar pruebas de unidades que requieran energía mecánica para su funcionamiento, como lo son las bombas, los divisores de flujo y las unidades toma fuerza (PTO). En primer lugar tenemos el subsistema de generación de energía mecánica a través del componente número 3, que corresponde a un motor de pistones axiales, el cuál está alimentado por la bomba de circuito cerrado n°2, la que a su vez es energizada con energía mecánica por el componente n°1 (motor diésel). Todos los componentes hidráulicos, se abastecen de fluido hidráulico gracias al estanque de la sala de bombas (componente n°5), acompañados de un filtro (componente n°4) y un enfriador ligado a una válvula check que impide un eventual retorno del drenaje del motor (componentes n°7 y n°6 respectivamente). Además, el motor hidráulico es monitoreado a través de manómetros conectados a los testpoint de este, cuyos parámetros se aprecian en el tablero de operación a través de los componentes n°15, 16, 17 y 18.

Con el suministro de energía mecánica listo, se tienen los circuitos de medición para las pruebas de distintos componentes. Para ir sometiendo a condiciones de operación reales a los componentes en prueba, se requiere ir aumentando la resistencia al flujo y así ir aumentando la carga a la bomba (o unidad en prueba), lo cual se logra con el uso de una válvula de carga o bien una electro-válvula reguladora de presión, la cual aumenta dicha carga variando un potenciómetro instalado en el panel del banco. Con esto y la ayuda de un flujómetro, se pueden obtener datos de operación reales. Estos datos finalmente se van comparando con las curvas de operación de los componentes, para así ir verificando que la reparación efectuada en taller resultó satisfactoria.

En primer lugar tenemos la prueba en ciclo hidrostático (o ciclo cerrado), el cual se explicó en el capítulo 2.10.1. Esta prueba utiliza 1 flujómetro con 1 válvula de carga, las cuales están conectadas a una disposición de válvulas check (componente n°21) que permite la operación en distintos sentidos (uno a la vez), facilitando la operación respecto a los giros predefinidos de las bombas en prueba.

En segundo lugar tenemos la prueba en circuito abierto (ver capítulo 2.10.1), la cual posee dos puntos de prueba para cada circuito de carga. Para hacer esto posible, se utilizan dos válvulas check (componentes n°24 para circuito de carga 1 y n°25 para circuito de carga 2). Entre los pares de válvulas check se tienen los circuitos abiertos que llegan a tanque. Estos se componen de un filtro de entrada (componente n°26), un flujómetro (componente n°27) y una válvula de carga (componente n°28), las cuales retornan a tanque pasando por otro filtro de retorno. La disposición de filtro de entrada, flujómetro, válvula de carga y filtro de retorno se replica para circuito de carga 1 y 2. Además, en la señal de circuito de carga 1, se tiene un terminal LS¹ que sirve para simular la señal de carga proveniente de un comando de válvulas cuando aumenta la carga en algún actuador.

El listado de componentes de este sistema se aprecia en la tabla 3.1

¹Load Sensing: es un sistema que recibe la señal de carga de un actuador o comando de válvulas y permite que una bomba de pistones axiales pueda variar el desplazamiento de los pistones gracias a dicha señal. (Fuente: Recuperado el 26 de Julio de 2019 de <https://www.lunchboxsessions.com/materials/load-sensing-pumps/load-sensing-pumps-lesson>)

N° Componente	Tipo componente	Modelo/Características	Cantidad
1	Motor diesel	Detroit Diesel S60 14,1L	1
2	Bomba de pistones axiales	Danfoss S90 250cc	1
3	Motor de pistones axiales	Danfoss S51 250cc	1
4	Filtro	Filtro FLR 927736	1
5	Estanque sala de bombas	500 Litros	1
6	Válvula check	Parker CVH201P	1
7	Enfriador	OATBI 16 4 c-220V/50hz	1
8	Válvula direccional 3/2	220822P 12-8-L	1
9	Acumulador	Acumulador de bladder - Sin placa	1
10	Manómetro hidrostático B	BTU controls 0-600 bar	1
11	Flujómetro drenó	Webtec CT60MABB6	1
12	Manómetro hidrostático A	BTU controls 0-600 bar	1
13	Flujómetro retorno 2	Webtec CT15MABB6	1
14	Flujómetro retorno 5	Webtec CT15MABB6	1
15	Vacuómetro transmisión hid.	TECSIS EN837 1/S 0 a 400 bar	1
16	Manómetro	BTU controls 0-400 bar	1
17	Manómetro	BTU controls 0-400 bar	1
18	Manómetro	BTU controls 0-400 bar	1
19	Manómetro carga 1	BTU controls 0-400 bar	1
20	Manómetro carga 2	BTU controls 0-400 bar	1
21	Conjunto de válvulas check	Parker CVH201P	4
22	Válvula de carga hidrostática	Parker R5V	1
23	Flujómetro hidrostática	Webtec CT800	1
24	Válvula check Circuito abierto 1	Parker CVH201P	2
25	Válvula check Circuito abierto 2	Parker CVH201P	2
26	Filtros Circuito abierto	Parker 38P	2
27	Flujómetros circuito abierto	Webtec CT300	2
28	Válvulas de carga circuito abierto	Parker R5V	2
29	Filtro Circuito abierto	Parker 38P	1
30	Estanque principal Banco de pruebas	1100 Litros C.ISO 17/15/12	1
31	Manifold de piso	-	1

Tabla 3.1: Listado de componentes del sistema n°1.

3.3.2. Sistema de prueba de motores y comandos de válvulas (Sistema n°2)

En el caso de los motores hidráulicos y comandos de válvulas, no se requiere del acoplamiento de un eje para su accionamiento, por lo cual solo se requiere de un fluido oleohidráulico con caudal y presión para hacerlos. En primer lugar, en la tabla 3.2 tenemos el listado de componentes de este sistema. Si miramos el circuito de la figura del anexo B.3, se aprecia que la bomba de pistones axiales (componente n°2) genera el caudal con presión necesarios para los distintos modos de prueba que posee este sistema.

N° Componente	Tipo componente	Modelo/Características	Cantidad
32	Bomba de pistones axiales	Danfoss S45 Frame E 130cc	1
33	Electro Válvula direccional 4/3	Argo Hytos RPE3-043H11	1
34	Válvula liberadora de presión	no identificado	1
35	Flujómetro	Webtec CT300	1
36	Válvula selectora (OR)	no identificado	1
37	Flujómetro	Webtec CT300	1
38	Caudalímetro Termómetro	200LPM 80°C	1
39	Flujómetro	Webtec CT300	1
40	Caudalímetro termómetro bomba c.1 Auger	200LPM 80°C	1
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	Parker 81T2E-108HS2	1
42	Selector Auger Spinner	Parker QDL Series 150LPM	1
43	Motor eléctrico	Siemens 100hp 2800RPM	1
44	Bomba de engranajes	Commercial P11 33cc	1
45	Válvula selectora (OR) PIT	Danfoss 4c401	1
46	Válvula direccional 3/2	220822P 12-8-L	1
47	Joystick 1 (izquierdo)	Danfoss PVRH	1
48	Joystick 2 (derecho)	Danfoss PVRH	1
49	Regulador caudal bomba 1	no identificado	1
50	Regulador LS Auger y Spinner	Parker R5V	1
51	Regulador LS bomba 1	Parker R5V	1

Tabla 3.2: Listado de componentes del sistema n°2.

El caudal generado por la bomba llega a una válvula distribuidora de 4 posiciones (componente n°52) (ver figura 3.4), la cual se encarga de configurar los distintos subsistemas que posee el circuito.



Figura 3.4: Palanca de válvula selectora (componente n°52).

Primera posición palanca selectora

En la primera posición el circuito se encuentra en **neutro** (cerrado) por lo cual no ocurre ningún efecto hidráulico en el sistema.

Segunda posición palanca selectora

En esta posición se puede realizar la prueba de **comandos de válvulas sin LS y motores hidráulicos**. Para ello, la bomba de pistones axiales (componente n°32) del circuito hidráulico del anexo B.3, entrega el caudal necesario para la prueba, llegando a la válvula distribuidora de 4 posiciones (componente n°41). En esta válvula, se debe seleccionar la posición 2, lo cual permite el flujo hacia un regulador de caudal (componente n°49) que regula el caudal de alimentación del componente en prueba, para luego bifurcar el flujo hacia el terminal de salida “Presión comando de válvulas sin LS”, y hacia la electro-válvula (componente n°33), cuyo accionamiento se logra con el switch “Válvula.^{en} la posición 2 desde el panel de operaciones de la figura 3.5. Con esto, el flujo sigue su curso hacia la válvula selectora (componente n°36), donde la única opción de flujo es llegar hacia el LS de la bomba y así entregar la señal de carga para mover el plato basculante² de la bomba.



Figura 3.5: Panel de ajustes banco de pruebas

²Plato basculante: corresponde a una superficie en donde se apoyan y giran los pistones y con ello se logra la variación de desplazamiento de acuerdo a las cargas solicitadas desde la señal LS.

Tercera posición palanca selectora

En esta posición se realizan pruebas de **motores o comandos de válvulas sin LS con caudal controlado por flujómetros y dos reguladores de caudal** (A:Auger con un máximo 37 LPM y S:Spinner con un máximo de 112 LPM). Si nos basamos en el sistema del anexo B.3, el flujo sale de la bomba hacia la válvula distribuidora de 4 posiciones (componente n°41) con posición 3, para luego llegar al divisor de flujo (Auger y Spinner) (componente n°42, el cual debe accionarse con la palanca de la figura 3.6) y dividirse por las salidas A y S. Ambas salidas se conectan a flujómetros (componentes n°37 y 39) para luego llegar a los terminales de salida a presión (“Presión Augerz “Presión Spinner”). Se destaca que del divisor de flujo genera la señal LS a través de uno de sus pórtricos, cuya regulación se logra con la válvula reguladora de presión (componente n°50) y llega a la válvula selectora (componente n°36), para luego pasar por la válvula reguladora de presión de LS de la bomba (componente n°51). Finalmente llega dicha señal a la bomba. Se destaca que aquí la electro-válvula (componente n°33) no tiene incidencia en el circuito, por lo que el switch del panel de operación de la figura 3.5 puede permanecer en cualquier posición.

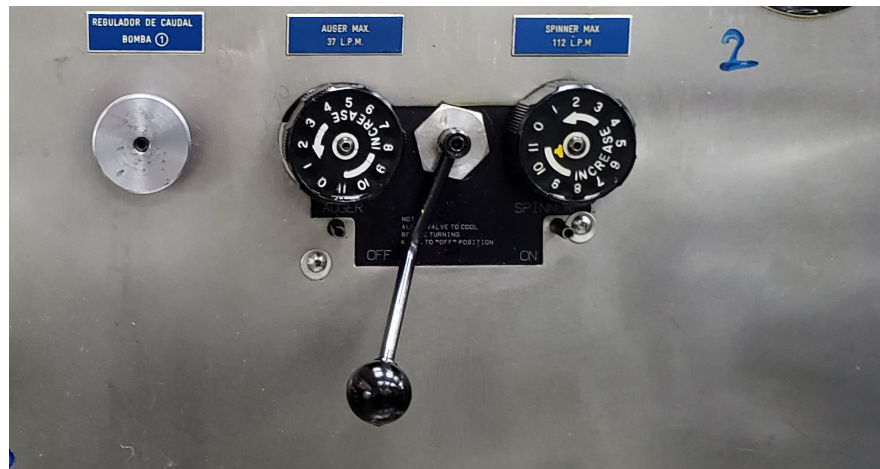


Figura 3.6: Válvula divisora de flujo (auger-spinner) (Componente n°53).

Cuarta posición palanca selectora

Esta última posición de la palanca selectora sirve para probar **comandos de válvula con LS**. Para ello la bomba (componente n°32) envía caudal directo a la válvula distribuidora (componente n°41) (obviamente en la posición 4), con lo cual el terminal “Presión comando de válvulas con LS” queda con presión. Por otro lado, el LS del comando en prueba se conecta a “LS comando de válvulasz esta señal se dirige a la electro-válvula (componente n°33) en donde se requiere que el switch eléctrico antes mencionado se accione hacia “4” para permitir el paso del fluido hacia la válvula selectora (componente n°36) y así completar su ciclo hacia el pórtrico LS de la bomba.

En general, cuando se tienen comandos con pilotajes hidráulicos, se utilizan los joystick (componentes n°47 y 48) que requieren de una nueva unidad de presión, como lo es una bomba de engranajes (componente n°44), que suministra el caudal necesario para el funcionamiento de ambos joystick. Si miramos el circuito de la figura del anexo B.3, se aprecia que estos joystick alimentan los primeros 4 pórticos (sobre la indicación de “actuador”) de la figura 3.7.



Figura 3.7: Terminales de prueba para pilotajes y actuadores.

3.3.3. Sistema de prueba para orbitroles y cilindros (Sistema n°3)

Este sistema sirve para realizar pruebas de orbitroles y cilindros. Su funcionamiento es similar al sistema n°2 y su diagrama se aprecia en la figura del anexo B.4. Para seleccionar los modos de prueba nuevamente se tiene una válvula selectora (componente n°53) que se acciona con la palanca de la figura 3.8.

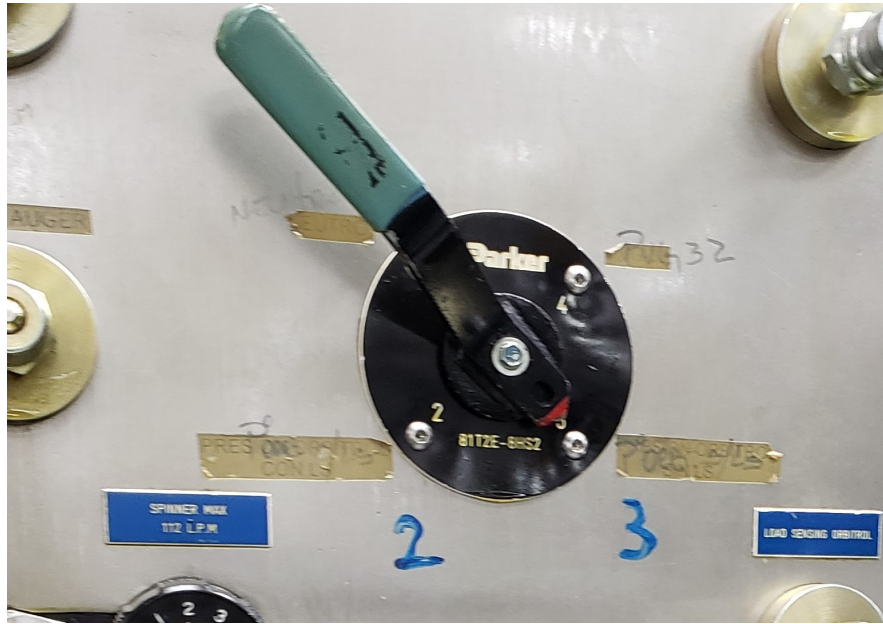


Figura 3.8: Palanca de válvula selectora (componente n°53).

El listado de componentes del sistema se aprecia en la tabla 3.3.

N° Componente	Tipo componente	Modelo/Características	Cantidad
52	Bomba de pistones axiales	Danfoss S45 Frame J 45cc	1
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	Parker 81TZE-108HS2	1
54	Válvula liberadora de presión	Parker R5V	1
55	Caudalímetro circuito 2 (reloj)	65LPM	1
56	Comando PVG 32	Danfoss PVG32 1 cuerpo	1
57	Reguladora de caudal bomba 2	no identificado	1
58	Reguladora de LS bomba 2	Parker R5V	1
59	Flujómetro bomba circuito 2	Webtec CT300	1
60	Electro válvula direccional 4/3	Argo Hytos RPE3-043H11	1
61	Válvula selectora (OR)	no identificado	1

Tabla 3.3: Listado de componentes del sistema n°3.

Primera posición palanca selectora

En la posición 1 el sistema se encuentra en neutro, mientras no se seleccione alguna posición, no tendremos caudal ni presión.

Segunda posición palanca selectora

En esta posición, se pueden probar **orbitroles con LS**. Para ello la bomba de pistones axiales (componente n°52) genera el caudal necesario para llegar al flujómetro

de la bomba del circuito 2 (componente n°59) y posteriormente llegar a la válvula distribuidora de 4 posiciones (componente n°53). En este punto (previa selección de la palanca en posición 2), el flujo se dirige a la alimentación del orbitrol en prueba, es decir, el terminal “Orbitroles con LS”. Además, desde el mismo orbitrol en prueba se obtiene la señal LS, que se conecta al terminal “Load sensing orbitrol”. Esta señal LS se dirige a la electro-válvula (componente n°60) que se acciona eléctricamente con el switch “Orbitrol 2” de la figura 3.5. Con esto la señal LS pasa hacia una válvula selector (componente n°61) y luego llega a la bomba.

Tercera posición palanca selector

Esta posición sirve para realizar pruebas de **orbitroles sin LS**. El flujo nuevamente sale por la bomba, pasando por el mismo fluómetro que la posición anterior, para luego llegar a la válvula distribuidora (componente n°53) (con palanca en posición 3). Posteriormente el flujo se dirige a un regulador de caudal (componente n°57), donde luego se divide para obtener una señal LS y además entregar presión al orbitrol en “presión orbitrol sin LS”. La señal LS mencionada, llega a la electro-válvula (componente n°60) (que requiere el switch de orbitrol hacia el número 3) para luego llegar a la válvula selector (componente n°61) y posteriormente a la bomba.

Cuarta posición palanca selector

Esta posición de la palanca permite realizar pruebas de **actuadores**. El suministro de caudal ocurre de la misma forma que las posiciones anteriores, con la diferencia de que en la válvula distribuidora de 4 posiciones (componente n°53) queda en su última posición. Esto permite el paso de caudal hacia la válvula PVG 32 (componente n°56) y además, dicha válvula entrega la señal LS requerida por la bomba. Además, suministra el caudal para los pódicos del panel de la figura 3.7. Los parámetros de pruebas se obtienen gracias al flujómetro que se encuentra entre los componentes n°52 y 53.

3.3.4. Sistema de trasvasije y enfriamiento (Sistema n°4)

Este sistema cumple la función de enfriar constantemente el aceite del depósito hidráulico principal (componente n°30) y además vaciar y limpiar el aceite que se va acumulando por las distintas fugas que puedan existir en los componentes en prueba, el cual se acumula en el estanque de fugas (componente n°67).

El diagrama hidráulico de este sistema se aprecia en la figura del anexo B.5 y se puede ver que se compone de una bomba de engranajes (componente n°63) acoplada a un motor eléctrico (componente n°62) en donde normalmente la válvula direccional (componente n°66) permite la circulación desde el estanque principal para luego, posterior a la etapa de bombeo, pase por un enfriador (componente n°65), desde donde se toma una muestra con un contador de partículas (componente n°64) y además pasar por una etapa de filtrado (componente n°69) para retornar a tanque.

En el caso de que el estanque de fugas se encuentre en un nivel definido, se acciona la válvula direccional previa a la bomba (componente n°66) y con esto se comienza a trasvasiar el fluido por fugas hacia el estanque. El resto del circuito sigue siendo idéntico al anterior hasta retornar a tanque.

N° Componente	Tipo componente	Modelo/Características	Cantidad
62	Motor eléctrico	Siemens 5hp 2800RPM	1
63	Bomba de engranajes	SNP3/ 26 DOO 26.3cc	1
64	IOS	Parker lcount	1
65	Enfriador	OATBI 16 4 c-220V/50hz	1
66	Válvula 3/2	no identificado	1
67	Estanque fugas	200 Litros	1
69	Filtro de retorno	FLR415-5WF4H 5 micras	1

Tabla 3.4: Listado de componentes del sistema n°4.

3.3.5. Sistema de conexiones y transporte de fluidos (Sistema n°5)

Este sistema contempla todas las conexiones tanto eléctricas como hidráulicas. El listado de componentes de este sistema se aprecia en la tabla 3.5.

N° Componente	Tipo componente	Modelo/Características	Cantidad
70	Data Logger	Webtec C2000	1
71	Manifold de alimentación	LUCAS 5 salidas	1
72	Flexibles	Hansa Flex hasta 500bar	1
73	Cañerías	-	1
74	Conectores/terminales	-	1

Tabla 3.5: Listado de componentes del sistema n°5.

Data Logger

El data logger es el encargado de recibir los datos obtenidos desde los flujómetros y transductores para digitalizar los valores experimentales obtenidos en las pruebas, los cuales serán utilizados en los informes de prueba. El Data logger utilizado es de la marca Webtec y el modelo es C2000 (ver figura 3.9).



Figura 3.9: Data Logger utilizado para la medición de parámetros (componente n°70).

Manifold de alimentación

Es el encargado de suministrar fluido oleohidráulico a las bombas que entran a prueba. Se alimenta directamente desde el estanque principal (ver figura 3.10).



Figura 3.10: Manifold de alimentación (componente n°71).

Flexibles

Se encargan de transportar los fluidos con la particularidad de que tienen conexiones rápidas y portátiles (ver figura 3.11).



Figura 3.11: Flexibles (componente n°72).

Cañerías

Se encargan de transportar los fluidos, sin embargo se diferencian de los flexibles por su nula portabilidad, es decir, permanecen fijas durante todo el tiempo (ver figura 3.12).

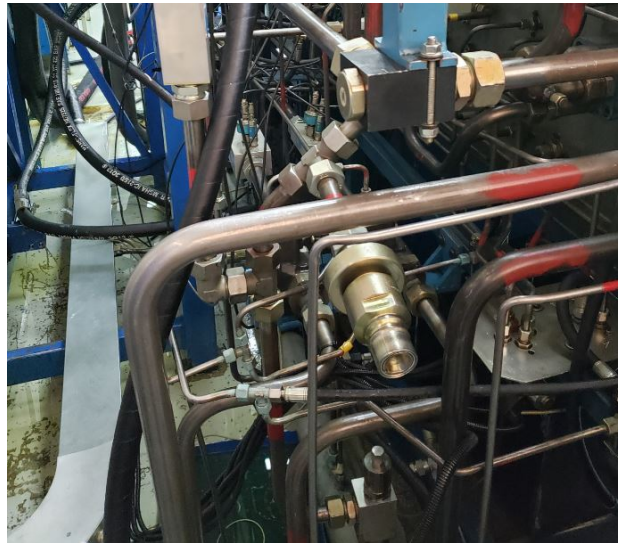


Figura 3.12: Cañerías (componente n°73).

Conectores/Terminales

Son los encargados de realizar las conexiones entre los sistemas y los flexibles que van a los componentes de prueba, su funcionamiento es de suma importancia para

mantener la estanqueidad del circuito (ver figura 3.13).



Figura 3.13: Conectores o terminales (componente n°74).

Capítulo 4

Proceso y análisis de mantenimiento

En este capítulo se realizará la aplicación de la teoría de mantenimiento vista anteriormente. Si observamos la figura 2.7, se comienza con un análisis FMECA que de acuerdo al valor entregado por el RPN, se decidirá que modo de falla requiere un análisis más detallado a través de la metodología RCM y que modo de falla puede definirse a través de un mantenimiento genérico.

Para comenzar con el proceso de mantenimiento, se define el equipo de trabajo que será de gran ayuda para la confección del FMECA como el RCM.

4.1. Equipo de trabajo

El equipo de trabajo debe ser compuesto por personal que se desempeñe en las distintas actividades que están relacionadas con el banco de pruebas. Para ello, se cuenta con personal de alta capacitación y experiencia en el área hidráulica y por sobre todo en el banco de pruebas, es por ello que la información que se puede obtener será muy fidedigna con respecto al activo a analizar.

El equipo de trabajo se conformará de la siguiente forma:

- Facilitador
- Operador
- Técnico Senior hidráulico
- Jefe de taller hidráulico
- Gerente de servicios y proyectos

Se destaca que el facilitador será la persona encargada de aplicar la lógica a utilizar, dirigir el análisis, gestionar y conducir las reuniones, administrar los tiempos y generar los consensos entre los participantes.

El resto de los integrantes tiene una basta experiencia en el funcionamiento del banco, parámetros técnicos de pruebas, y por sobretodo conocimiento en el historial de mantenimientos que se han hecho durante la vida útil del activo.

4.2. FMECA

Con el grupo de trabajo conformado, se procede a analizar los modos de falla de cada uno de los componentes que conforma el banco de pruebas.

En el banco de pruebas se tienen 74 componentes divididos en 5 sistemas, sin embargo muchos de estos componentes se repiten y algunos son componentes de control, por lo cual la lista definitiva sin repetición contiene 22 tipos distintos (enumerados por letras para evitar confusiones con los identificadores de los sistemas) y se aprecian en la tabla 4.1.

Letra	Tipo de componente
A	Motor diesel
B	Bomba de pistones axiales
C	Motor de pistones axiales
D	Filtros
E	Estanques
F	Válvulas check
G	Enfriadores
H	Válvulas direccionales
I	Acumulador
J	Flujómetros
K	Válvulas reguladoras de presión
L	Manifolds
M	Válvulas selectoras
N	Válvulas de control de flujo Auger-Spinner
O	Motores eléctricos
P	Bombas de engranajes
Q	Joysticks
R	Reguladores de caudal
S	Flexibles
T	Cañerías
U	Conectores/terminales
V	Data Logger

Tabla 4.1: Listado de componentes filtrados para confeccionar el análisis FMEA.

Inicialmente el análisis FMECA se realiza a los componentes de la tabla 4.1. De acuerdo a esto, se recolecta información acerca de los modos de falla típicos, efectos de falla, causas de falla, detectabilidad de cada modo de falla e índices para calcular el número de prioridad de riesgo (RPN). Con el análisis plasmado para cada tipo de componente, se procede a completar el análisis completo. Este análisis se puede ver en el anexo C.

4.2.1. Modos de falla

Haciendo un recuento de los datos de modos de falla obtenidos del análisis FMECA, los que más se repiten con una frecuencia mayor o igual a 5, se aprecian en la figura 4.1.

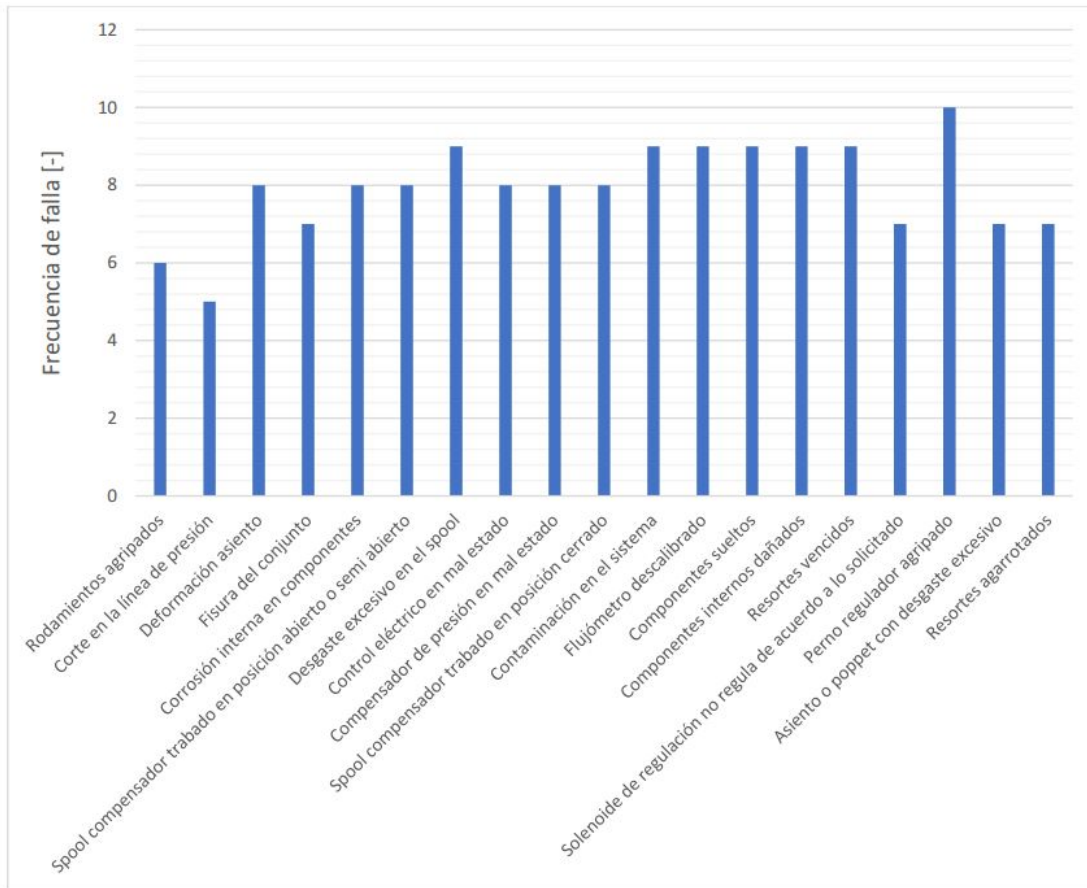


Figura 4.1: Modos de falla con una frecuencia mayor a 5. (Fuente: Datos obtenidos del análisis FMECA)

De aquí tenemos una serie de modos de falla con una frecuencia similar, sin embargo hay modos de falla que jamás han ocurrido y son incluidos netamente por su posible severidad ante una ocurrencia, es por ello que para hacer más completo el análisis de los modos de falla se requiere poner atención al riesgo asociado y además a las causas que lo originan.

4.2.2. Análisis de riesgo

En primer lugar, los modos de falla poseen un índice de severidad, ocurrencia y detectabilidad que componen el RPN. Estos índices están relacionados con el FMECA de la siguiente forma:

- Efecto de falla - Severidad (S)
- Causas de falla - Ocurrencia (O)
- Control de detección - Detectabilidad (D)

En base a esto, se requiere tener en conocimiento cuales son los modos de falla y sus efectos que serán catalogados como críticos. Se destaca que de acuerdo a la norma IEC 60812 [7], además del criterio del valor RPN, se debe catalogar a los modos de falla con mayor índice de severidad (9 y 10) como críticos, independiente del valor RPN, ya que pueden provocar la muerte a una persona en caso de su ocurrencia.

Con respecto al valor límite del RPN, se requiere definir desde que valor un modo de falla es considerado como crítico para el sistema. Para ello, se utiliza el Diagrama de Pareto ¹, que muestra una gráfica de la distribución de cada uno de los modos de falla de acuerdo a dicho indicador numérico de riesgo. Si observamos la figura 4.2, la mayor frecuencia de modos de falla se da en el rango RPN de **50 a 82** contemplando casi un 40% de los casos, por lo que para definir el valor límite, se calculará el promedio de este rango, cuyo valor es 66. Este valor será el mínimo RPN catalogado como crítico (**RPN ≥ 66**).

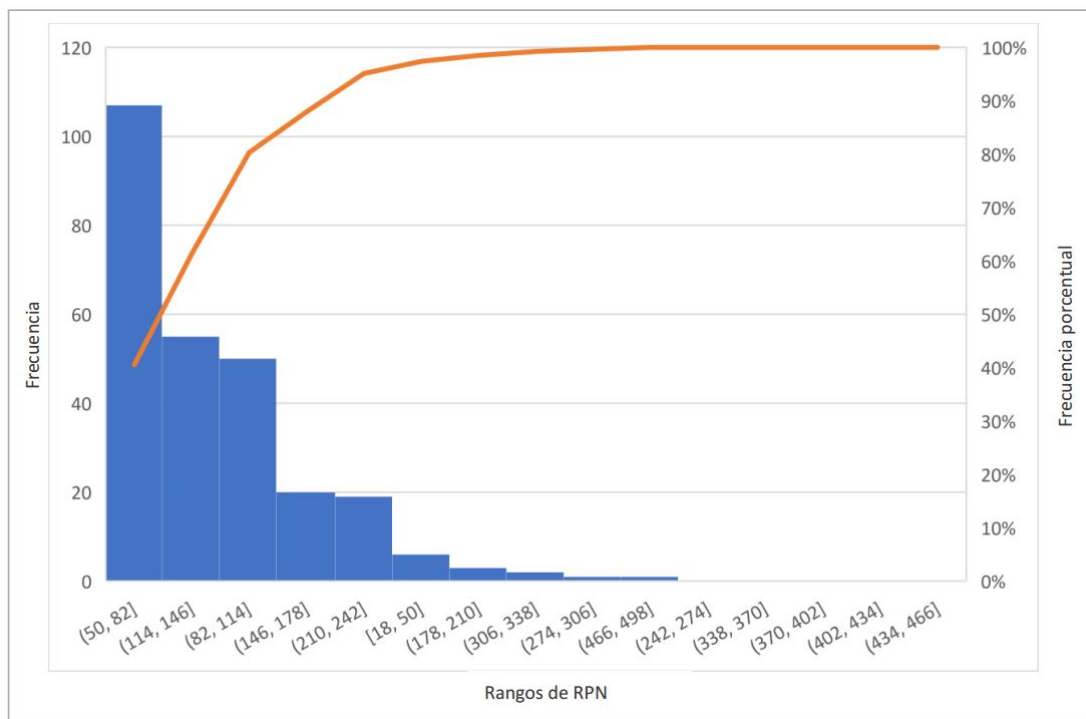


Figura 4.2: Diagrama de Pareto del RPN asociado con su frecuencia en los datos. (Fuente: extracción de datos obtenidos en el análisis FMECA)

¹El principio de Pareto es también conocido como la regla del 80-20, señala que la distribución de los efectos como sus posibles causas no es un proceso lineal, sino que el 20% de las causas totales hace que sean originados el 80% de los efectos.

Análisis de los modos de falla

A modo de obtener mayor información relativa a seguridad operacional, se realiza un análisis de los efectos de los modos de falla del anexo C.

Si realizamos un filtro de datos con una severidad de 9 y 10, considerando la mayor ocurrencia dada en el análisis RPN ($O=6$), tenemos los siguientes resultados:

- Motor pierde estanqueidad a alta presión: El fluido a alta presión se libera rápidamente al ambiente.
- Flexible se suelta al ser sometido a presión: Movimientos bruscos y pérdida de aceite a alta presión al ambiente.

El segundo modo de falla mostrado ocurrió en el taller en el mes de febrero del presente año. Sin embargo, solo provocó una pérdida de fluido oleohidráulico al piso, sin dañar a ningún operario.

Con respecto a los efectos operacionales, se realiza un filtro de datos con una severidad entre 6 y 8. Además se considera una ocurrencia mayor o igual a 5, debido a que según el parámetro de ocurrencia de la tabla 2.2, es posible tener una tasa de falla de 1 en 400, lo cual es un piso razonable para comenzar hacia mayores ocurrencias. Estos modos de falla filtrados son los más propensos a reducir la capacidad operacional del banco de pruebas o definitivamente impedir su funcionamiento. Además se destaca que muchos de estos, poseen un índice de detectabilidad relativamente alto, lo que indica que son dificultosos a la hora de detectarlos. Con estas consideraciones tenemos los siguientes resultados.

Entre los modos de falla operacionalmente más críticos tenemos:

- Flujómetro descalibrado: debido a un incumplimiento en la fecha de calibración recomendada por el fabricante.
- Asiento o poppet con desgaste excesivo: propio de las válvulas producto de desgaste excesivo por aceite contaminado.
- Placas de empuje pegadas: por falta de lubricación en las bombas de engranajes.
- Devanado abierto en motor eléctrico: Corte de devanados por temperatura y uso.

Para conocer las causas que originan estos modos de falla, es necesario analizar las causas potenciales, por lo tanto se realiza un análisis de las causas potenciales en la siguiente sub-sección.

4.2.3. Análisis de causas potenciales

Siguiendo con la línea de analizar los modos de falla que tienen mayor impacto en la seguridad como en la operación, se analizan las causas potenciales relacionadas a los criterios utilizados anteriormente. Este filtro de datos, se aprecia en el anexo D y su resultado se aprecia en la figura 4.3

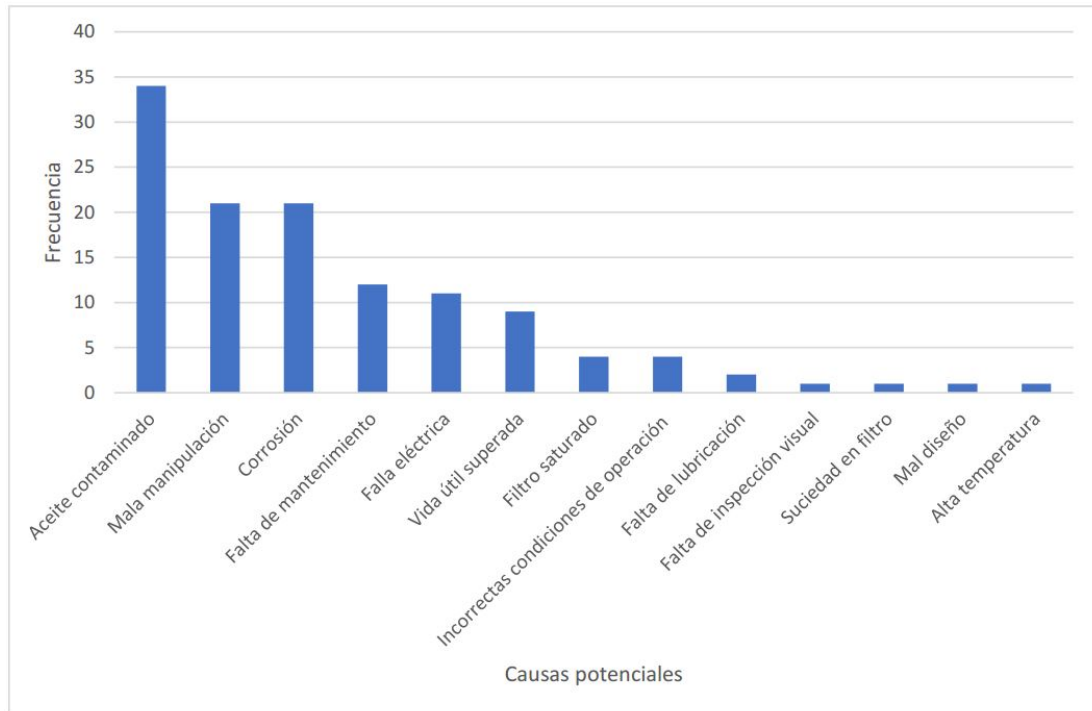


Figura 4.3: Gráfico de causas potenciales, con respecto a su frecuencia en los datos del FMECA. Se destaca que la mayor cantidad de causas potenciales se obtiene del juicio experto de los técnicos hidráulicos, lo que también se complementa con los manuales de fallas que se encuentran en la información técnica de la empresa.

De la figura 4.3, podemos apreciar que la causa más común para los modos de falla en los componentes hidráulicos es el **aceite contaminado**. Esto demuestra que la causa principal de una falla hidráulica se debe al desgaste de componentes internos producto de la abrasión causada por un aceite contaminado. Esta causa inicialmente provoca desgaste, lo que se traduce en una temprana pérdida de material, o bien un aumento en la fricción entre partes móviles, que se relaciona directamente con el aumento de la temperatura del aceite y por ende la pérdida de su capacidad lubricante. Finalmente esto termina en un desgaste excesivo de muchos componentes internos para terminar en la nula capacidad operativa del componente hidráulico.

La segunda causa con mayor frecuencia es la **mala manipulación**, esto se debe principalmente a que en muchas ocasiones no se respeta la serie de pasos que reco-

mienda el fabricante en una instalación o bien en la manipulación de componentes hidráulicos. Se atribuye al error humano. Además, se tiene la **corrosión** de piezas internas. Esta causa esta directamente relacionada al aceite contaminado, ya que algunas veces el aceite por problemas de filtrado y aireación, contiene más agua de lo permitido por la norma ISO 4406 [10]. Es por ello que es primordial mantener el aceite con un grado de limpieza recomendado para cada componente, lo cual se puede apreciar en la tabla 4.2.

Luego, las causas más comunes se relacionan a la **falta de mantenimiento**, es decir, operar más allá de las rutinas de mantenimiento programadas. Esto ocurre mucho en el rubro, ya que por aumentar la productividad, se deja de lado las tareas de mantenimiento. Esto ocurre frecuentemente en tareas de calibración de flujómetros, los cuales deben ser enviados al fabricante (Webtec) en Inglaterra.

Limpieza del Fluido para los Componentes Hidráulicos Típicos	
Componentes	Código ISO
Válvulas de Servo control	17/14/11
Válvulas Proporcionales	18/15/12
Bombas/ motores de paleta y piston	19/16/13
Válvulas de control de presión y direccional	19/16/13
Motores/bombas engranes	20/17/14
Cilindros, válvulas de control de flujo	21/18/15
Fluido nuevo, sin usar	21/18/15

Tabla 4.2: Códigos de limpieza “ISO”. Tabla extraída de la norma ISO 4406 [10].

4.3. Hoja de decisión RCM

Con la información del análisis de los modos de falla, además de la definición numérica de criticidad de acuerdo al RPN, estamos en condiciones de hacer un filtrado de datos, tal como se menciona anteriormente, para poder analizar con mayor detalle los modos de falla más críticos. Para ello utilizaremos la teoría de la sección 2.8 en conjunto con el diagrama de decisión RCM de la figura 2.10 para completar la hoja de decisión RCM propuesta en el marco teórico.

El detalle completo de la hoja de decisión se encuentra en el **anexo E**.

Capítulo 5

Plan piloto de mantenimiento y disponibilidad proyectada

En este capítulo se comentan los resultados del plan piloto de mantenimiento posterior a la aplicación del método RCM. Además, se entrega un valor de disponibilidad por cada sistema en base al juicio experto de los técnicos hidráulicos operarios del banco de pruebas.

5.1. Plan piloto de mantenimiento

Gracias a la hoja de decisión RCM descrita en secciones anteriores, se construye la propuesta de mejora al plan de mantenimiento que existe en la empresa. La hoja de decisión RCM se aprecia en el anexo E, en donde está separada por sistemas.

Al realizar el filtro por criticidad, algunos modos de falla quedaron fuera del análisis RCM, ya que según la planificación, al tener una baja criticidad se seguiría la opción del mantenimiento genérico, que en este caso corresponde a seguir utilizando el mantenimiento preventivo cada 450 horas. Como dato, se tiene una totalidad de 317 modos de falla, los cuales se reducen a 201 utilizando el criterio de $RPN \geq 66$.

Se destaca que para confeccionar esta propuesta de mejora o plan piloto de mantenimiento, los modos de falla estudiados consideran un contexto de uso de laboratorio, ya que la finalidad del activo es realizar pruebas hidráulicas a los equipos previamente reparados. Por otro lado, no es un plan de mantenimiento completo, ya que faltan muchas variables y detalles técnicos, como por ejemplo las herramientas a utilizar, proveedores específicos, insumos necesarios y detalle completo de los pasos a seguir. Por lo tanto, la profundidad de este plan queda propuesto como tema de memoria de titulación para desarrollar.

Las tareas propuestas en el plan piloto, son repetitivas en muchos casos, por lo que

podemos realizar un análisis de frecuencia para cada tarea a recomendada a partir del diagrama de decisión RCM. Para realizar este análisis, utilizaremos la gráfica de la figura 5.1.

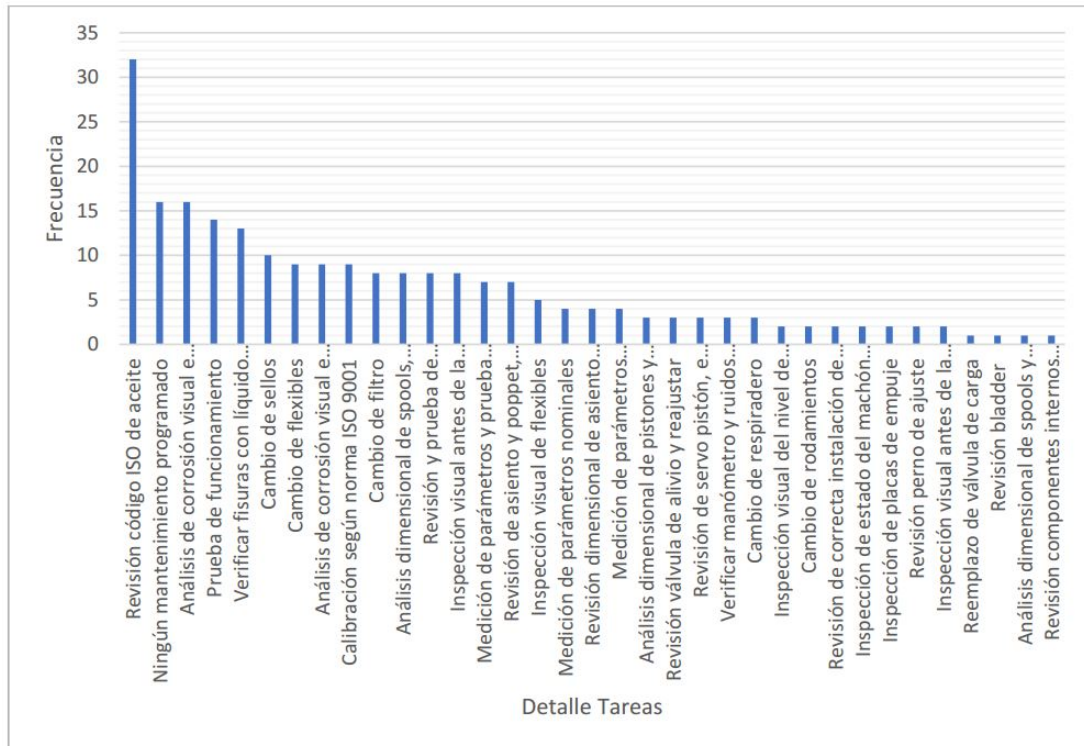


Figura 5.1: Gráfico de las tareas propuestas y su distribución.

De la figura 5.1, podemos apreciar que la tarea con mayor frecuencia es la inspección diaria del código de limpieza ISO, que se puede monitorear a través del instrumento de medición IOS (componente n°64) del sistema n°4 (ver plano hidráulico de la figura B.5).

Luego, la tarea que sigue con alta frecuencia corresponde a “ningún mantenimiento programado”. Esta tarea es de acción correctiva y se da mucho en componentes hidráulicos que son difíciles de monitorear internamente, como los asientos de válvulas que no se pueden desarmar o bien en machones de acople desgastados que pueden provocar un funcionamiento fuera de lo esperado en una bomba o motor. Se destaca que la gran cantidad resulta debido a que el banco de pruebas posee muchas válvulas check, válvulas de control de flujo o reguladoras de caudal.

Siguiendo con el orden descendente en frecuencia, se encuentran algunas tareas de monitoreo de condición (análisis de corrosión e inspecciones de fisuras con líquido penetrante) y búsqueda de fallas (prueba de funcionamiento). Estas tareas, regularmente

no se consideran en el mantenimiento común de la empresa, ni siquiera una inspección visual antes de realizar la puesta en marcha, con lo cual se podrían prevenir muchos modos de falla.

Luego tenemos las tareas de sustitución cíclica, como los cambios de sellos, rodamientos y flexibles, que son la primera mirada de las generaciones de mantenimiento preventivo. Se nota que no es de las tareas más frecuentes, a raíz de que el RCM busca entregar la tarea más óptima para prevenir el modo de falla, sin embargo se da por la naturaleza de los componentes, ya que poseen una vida útil determinada por el fabricante.

Al ser la gran mayoría componentes oleohidráulicos, generalmente los problemas de funcionamiento están relacionados con la suciedad o filtros en mal estado, por lo tanto, las rutinas diarias de inspección (monitoreo de condición) son vitales para detectar una falla antes de que ocurra y además prevenir los riesgos de seguridad, ambientales y operacionales.

5.2. Proyección de disponibilidad del banco

A modo de tener un valor proyectado de disponibilidad y sin contar con datos históricos de tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio para reparar (MTTR), se realiza un levantamiento de datos entre los operarios con mayor tiempo en la empresa que trabajen en el banco de pruebas para que el juicio experto sea lo más fidedigno posible. Los datos solicitados son:

- Frecuencia de reparación o cambio de cada componente del banco de pruebas, lo que se traduce en un MTBF.
- Tiempo normal de reparación para cada componente del banco de pruebas, que se traduce en un MTTR.

Gracias a esto, se obtienen los datos de la tabla 5.1. Se aprecia que se obtienen disponibilidades por sistemas, debido a que en ningún proceso de prueba el banco funciona en paralelo.

Sistema	N° Componente	Control	Tipo componente	Cantidad	MTBF [hrs]	MTTR[Hrs]	A_i	A_subsis ema	A_sistema
1	1	No	Motor diesel	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	0,7468
	2	No	Bomba de pistones axiales	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	3	No	Motor de pistones axiales	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	4	No	Filtro	1	450	2	0,9956	0,9956	
	5	No	Estanque sala de bombas	1	450	2	0,9956	0,9956	
	6	No	Válvula check	1	3225,6	4	0,9988	0,9988	
	7	No	Enfriador	1	5644,8	8	0,9986	0,9986	
	8	No	Válvula direccional 3/2	1	403,2	1	0,9975	0,9975	
	9	No	Acumulador	1	1612,8	24	0,9853	0,9853	
	10	Si	Manómetro hidrostático B	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	11	No	Flujómetro drenó	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	12	Si	Manómetro hidrostático A	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	13	No	Flujómetro retorno 2	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	14	No	Flujómetro retorno 5	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	15	Si	Vacuómetro transmisión hid.	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	16	Si	Manómetro	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	17	Si	Manómetro	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	18	Si	Manómetro	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	19	Si	Manómetro carga 1	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	20	Si	Manómetro carga 2	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	21	No	Conjunto de válvulas check	4	3225,6	4	0,9988	0,9951	
	22	No	Válvula de carga hidrostática	1	806,4	4	0,9951	0,9951	
	23	No	Flujómetro hidrostática	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	24	No	Válvula check Circuito abierto 1	2	3225,6	4	0,9988	0,9975	
	25	No	Válvula check Circuito abierto 2	2	3225,6	4	0,9988	0,9975	
	26	No	Filtros Circuito abierto	2	450	2	0,9956	0,9912	
	27	No	Flujómetros circuito abierto	2	450	6,4	0,9860	0,9722	
	28	No	Válvulas de carga circuito abierto	2	806,4	4	0,9951	0,9902	
	29	No	Filtro Circuito abierto	1	450	2	0,9956	0,9956	
	30	No	Estanque principal Banco de pruebas	1	450	2	0,9956	0,9956	
	31	No	Manifold de piso	1	450	24	0,9494	0,9494	
2	32	No	Bomba de pistones axiales	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	0,9057
	33	No	Electro Válvula direccional 4/3	1	403,2	1	0,9975	0,9975	
	34	No	Válvula liberadora de presión	1	806,4	4	0,9951	0,9951	
	35	No	Flujómetro	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	36	No	Válvula selectora (OR)	1	4838,4	4	0,9992	0,9992	
	37	No	Flujómetro	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	38	Si	Caudalímetro Termómetro	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	39	No	Flujómetro	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	40	Si	Caudalímetro termómetro bomba c.1 Auger	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	41	No	Válvula distribidora 4 posiciones	1	806,4	16	0,9980	0,9980	
	42	No	Selector Auger Spinner	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	43	No	Motor eléctrico	1	806,4	16	0,9980	0,9980	
	44	No	Bomba de engranajes	1	2419,2	8	0,9967	0,9967	
	45	No	Válvula selectora (OR) PIT	1	4838,4	4	0,9992	0,9992	
	46	No	Válvula direccional 3/2	1	403,2	1	0,9975	0,9975	
	47	No	Joystick 1 (izquierdo)	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	48	No	Joystick 2 (derecho)	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	49	No	Regulador caudal bomba 1	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	50	No	Regulador LS Auger y Spinner	1	806,4	4	0,9951	0,9951	
	51	No	Regulador LS bomba 1	1	806,4	4	0,9951	0,9951	
3	52	No	Bomba de pistones axiales	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	0,9576
	53	No	Válvula distribidora 4 posiciones	1	806,4	16	0,9980	0,9980	
	54	No	Válvula liberadora de presión	1	806,4	4	0,9951	0,9951	
	55	Si	Caudalímetro circuito 2 (reloj)	1	403,2	4	0,9902	0,9902	
	56	No	Comando PVG 32	1	9676,8	8	0,9992	0,9992	
	57	No	Reguladora de caudal bomba 2	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	
	58	No	Reguladora de LS bomba 2	1	806,4	4	0,9951	0,9951	
	59	No	Flujómetro bomba circuito 2	1	450	6,4	0,9860	0,9860	
	60	No	Electro válvula direccional 4/3	1	403,2	1	0,9975	0,9975	
	61	No	Válvula selectora (OR)	1	4838,4	4	0,9992	0,9992	
4	62	No	Motor eléctrico	1	806,4	16	0,9980	0,9980	0,9859
	63	No	Bomba de engranajes	1	2419,2	8	0,9967	0,9967	
	64	Si	IOS	1	3225,6	2	0,9994	0,9994	
	65	No	Enfriador	1	5644,8	8	0,9986	0,9986	
	66	No	Válvula 3/2	1	403,2	1	0,9975	0,9975	
	67	No	Estanque fugas	1	900	2	0,9978	0,9978	
	69	No	Filtro de retorno	1	900	2	0,9978	0,9978	
5	70	No	Data Logger	1	9676,8	16	0,9983	0,9983	0,9591
	71	No	Manifold de alimentación	1	900	24	0,9740	0,9740	
	72	No	Flexibles	1	2419,2	8	0,9967	0,9967	
	73	No	Cañerías	1	2419,2	24	0,9902	0,9902	
	74	No	Conectores/terminales	1	4838,4	3	0,9994	0,9994	

Tabla 5.1: Disponibilidad proyectada a través del juicio experto de los técnicos hidráulicos.

Capítulo 6

Costos relativos al plan de mantenimiento

En este capítulo se muestran los resultados del análisis económico del plan piloto de mantenimiento, incluyendo indicadores relevantes del banco de pruebas, los cuales serán utilizados en el modelo económico propuesto.

6.1. Tiempos y costos asociados al banco de pruebas

Para poder aplicar nuestro modelo económico, es necesario conocer información estadística del banco de pruebas, en conjunto con los valores que maneja la empresa en caso de una detención no esperada.

6.1.1. Tiempo de uso

El banco de pruebas se utiliza todos los días hábiles del año con una media de 3,6 horas diaras, lo cual nos entrega un tiempo de uso $T_{b,p}$ de 900 horas anuales.

$$T_{b,p} = 900 \quad [h/a]$$

6.1.2. Tiempo de reparación de un componente del banco de pruebas

Para estimar el tiempo de reparación, se utiliza el juicio experto de los técnicos del banco de pruebas que ya han realizado mantenimientos previamente.

6.1.3. Costo de ineficiencia

Este indicador fue estimado por la gerencia de servicios y proyectos de la empresa, y su valor promedio ante fallas no previstas del banco de pruebas es:

$$C_{inef} = 1,147,826 \quad [$/h]$$

Se destaca que este valor depende del tiempo de ineficiencia T_{inef} , es decir, la pérdida asociada a una falla no prevista se calcula multiplicando el costo de ineficiencia con el tiempo asociado a esta falla. Este dato solo se usa ante una intervención correctiva en donde no hay ningún mantenimiento planificado.

6.1.4. Insumos

Contemplan todos los artefactos necesarios para realizar el mantenimiento, ya sea correctivo o preventivo.

Por otro lado, incluyen los costos de instrumentos utilizados en la predicción de una falla. Estos abarcan el caso del análisis de corrosión, centrado de ejes, y técnicas de monitoreo de condición más exactas. En este caso, si se requiere sub-contratación de servicios, el valor puede variar.

En general, la empresa maneja un valor generalizado para todos los insumos utilizados dentro de la empresa, ya sea en reparaciones, pruebas hidráulicas o inspecciones. Este valor es:

$$I_h = 4,758 \cdot [$/unidad]$$

Para conocer la cantidad de insumos, la empresa tiene definida una cantidad de acuerdo al tipo de componente a reparar.

6.1.5. Costo de Horas hombre

Ante una reparación o mantención, la empresa maneja un valor fijo para estimar las horas de trabajo necesarias. Ante una reparación, las horas hombre tienen un valor de:

$$HH = 6,000 \cdot [$/h]$$

Este valor es ponderable de acuerdo al tipo de trabajo a realizar, ya que ante una inspección, se puede asumir que el costo de horas hombre es la cuarta parte del valor estimado por la empresa.

6.2. Costos del plan piloto

Los costos relativos al plan piloto propuesto se dividen en dos tipos:

- Costos correctivos: En donde de acuerdo a la hoja de decisión, se decide esperar que falle el componente.
- Costos preventivos: Abarcan todos los costos restantes del plan piloto. Incluyen tareas preventivas y predictivas. Buscan prevenir la falla con acciones planificadas.

6.2.1. Costos correctivos

De acuerdo al modelo de costos correctivos visto en el marco teórico (ver ecuación 2.17) y los valores expuestos en la sección anterior, se construye la tabla de costos correctivos del anexo F.1. Estos costos son anuales, y se utiliza ayuda del equipo RCM para obtener los valores costo de distintos repuestos que se manejan por el sistema de gestión de la empresa. Finalmente el costo correctivo anual tiene un valor de:

$$C_{corr} = \$43,075,848$$

6.2.2. Costos preventivos

De manera análoga a los costos correctivos, utilizando la ecuación 2.15 se obtienen los valores para los costos proactivos de la tabla del anexo F.2. El costo preventivo anual tiene un valor de:

$$C_{prev} = \$35,453,991$$

Se destaca que el valor mayor de los costos correctivos, esta directamente relacionado con el costo de ineficiencia del banco de pruebas, el cual depende del tiempo de reparación y el tiempo de reacción de los encargados de mantenimiento. Además, el escenario de los repuestos en el caso correctivo, dependen netamente de los repuestos de bodega, ya que en el caso de que no haya stock, en algunos casos hay que importar el repuesto y eso subiría los costos de ineficiencia exponencialmente, es por ello que se recomienda mantener un stock permanente de los repuestos críticos de los componentes difícil de conseguir en el mercado nacional. El tema de los proveedores estratégicos para esta situación no está dentro de los alcances de este trabajo de titulación. Finalmente el costo total del plan piloto de mantenimiento tiene un valor anual de \$78,529,839 pesos.

Capítulo 7

Propuestas de mejora

En esta capítulo se propondrán algunas oportunidades de mejora extraídas a lo largo del trabajo realizado, en virtud de una mejor gestión del mantenimiento, con un enfoque de seguridad, desarrollo sustentable con respecto al medio ambiente y operacional. Para lograr esto se utilizará la herramienta de mejora continua 5W-1H (ver sección 2.12) con el objetivo de entregar una matriz del plan de acción propuesto.

7.1. Plan de acción

El enfoque principal de este trabajo de título es mejorar la seguridad en la operación del banco de pruebas, así como también tener un uso sustentable sin perder de vista la mejora de la capacidad operativa. En virtud de estos enfoques, se construye un plan de acción a partir de la metodología 5W-1H. Este plan de acción se aprecia en las figuras 7.1 y 7.2.

En el plan de acción, se aprecia un enfoque en reducir los accidentes a cero y mejorar el control de la operación y mantenimiento del banco.

7.1.1. Enfoque reducción de accidentes

En este enfoque, se tienen algunos números de referencia que representan a la pregunta ¿Qué? y están representados por los puntos 1.1 a 1.4 de la figura 7.1. Estas recomendaciones surgen a partir del juicio experto de los técnicos hidráulicos que operan el banco, por lo que se aprovecha su conocimiento para generar esta propuesta. Se destaca que están ordenadas de corto a mediano plazo, siendo estos 3 a 6 meses respectivamente.

7.1.2. Enfoque mejora de control en operación y mantenimiento

El segundo enfoque, está representado por los números 2.1 a 2.3 de la figura 7.2. Los criterios para definir estas recomendaciones surgen a partir de la recopilación de

datos al inicio del trabajo, en donde la información existente relativa al mantenimiento es muy escasa. Para mejorar estas problemáticas se genera el plan de acción y además se propone la implementación de 3 hojas de registro.

La primera hoja (ver figura del anexo G.1), comprende información de uso diario del banco de pruebas, además de una lista de chequeo construida a partir de las tareas de inspección recomendadas en el análisis RCM.

La segunda hoja (ver figura del anexo G.2), está diseñada para registrar las intervenciones preventivas o programadas para el banco de pruebas, nuevamente abarca la mayoría de tareas recomendadas en el análisis RCM y da el espacio de explicar alguna observación vista en el mantenimiento.

La tercera hoja (ver figura del anexo G.3), se diseña para las intervenciones correctivas en el caso de que ocurrieran.

Se destaca que todas estas hojas incluyen datos de fechas, horas registradas, tiempos de reparación, entre otros, para así ir construyendo una base de datos de mantenimiento que sirva para realizar en un plazo de 18 meses un análisis estadístico de confiabilidad en el banco de pruebas.

MATRIZ 5W-1H PLAN DE ACCIÓN												
QUÉ WHAT			POR QUÉ WHY		CÓMO HOW				DONDE WHERE	QUIÉN WHO	CUANDO WHEN	
Id.	FACTOR CRÍTICO DE ÉXITO	Id.	PROCESO DE DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS DE EJECUCIÓN PLAN DE ACCIÓN	Problemática	Metas	Actividades	Mecanismo de seguimiento	Barreras a superar	Resultado Esperado	Ubicación	Responsable	Plazo meses
1	Reducir los accidentes anuales en la operación del banco a cero	1	Cierre completo de los costados y parte superior del banco de pruebas	Se necesita impedir el acceso a todas las zonas traseras del banco ya que existen muchas cañerías y flexibles que están a una alta presión cuando se realiza una prueba hidráulica	Realización del cierre total de la zona posterior al banco de pruebas	Definir empresa contratista para que efectúe el trabajo de instalación de paneles y techo con los mismos materiales que posee el panel frontal del banco de pruebas	Carta gantt con empresa contratista	Presupuesto	Cierre satisfactorio de todo el banco de pruebas con nulo acceso para los operarios	Sala banco de pruebas	Ingeniero de gestión de servicio	3
		2	Reubicación de conectores y test points en las zonas de prueba de componentes hidráulicos	La ubicación de estos conectores se encuentra en el mismo sector en donde se realizan los ajustes en las pruebas, por lo que en el caso de la falla de una sujeción en los conectores, podría dañar al técnico	Rediseño en la ubicación de estos conectores críticos	De acuerdo al rediseño propuesto, se cotizan los insumos necesarios y en las detenciones planificadas del banco, los técnicos hidráulicos con la ayuda de maestranza realizan el cambio	Verificación de actividades por parte del ingeniero de gestión de servicio	Presupuesto	Cambio satisfactorio en la zona de los conectores y test points con alta presión	Sala banco de pruebas	Ingeniero de gestión de servicio	3
		3	Protocolo de no pasar a la sala de motores y bombas cuando el banco esté en funcionamiento	Se requiere la instalación de señalética y una luz roja que indique el no paso de personas a la sala de bombas cuando existe funcionamiento del banco	Diseño de señalizaciones y conexiones para que la luz roja se encuentre coordinada con el funcionamiento del banco	Definir empresa contratista para la instalación de la luz coordinada con el banco de pruebas. Además, el departamento de prevención deberá redactar normas de operación y señalética extra para el banco de pruebas	Verificación de actividades de prevención de riesgos	Técnicos no obedezcan normativa e ingresen a la sala de bombas cuando banco está en funcionamiento	Instalación de luz, normativa en sala de banco y señalética visible para los operarios	Sala banco de pruebas y puerta de entrada a sala de bombas	Prevención de riesgos	3
		4	Mejoramiento del piso de la sala del banco de pruebas	Existe una problemática frecuente del aceite que se pierde en las pruebas hidráulicas, el cual cae al piso y este se torna resbaladizo. Además al realizar la limpieza de este, se termina desechando en contenedores de basura	Diseño de plataforma sobre el piso para contener el aceite perdido e instalación de bomba oleohidráulica para retornarlo al estanque a través de filtros	Departamento de proyectos diseñará plataforma, la cual será construida por el departamento de maestranza. Además, la instalación de la bomba la realizará personal del taller hidráulico	Verificación de actividades por parte del ingeniero de gestión de servicio	Presupuesto	Plataforma instalada con funcionamiento automatizado, sin pérdida de aceite en el piso	Sala banco de pruebas	Ingeniero de gestión de servicio	6

Figura 7.1: Matriz 5W-1H para el plan de acción propuesto (parte 1). Fuente: elaboración propia en base a lo expuesto por el artículo “Las 5W + H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos” [13].

MATRIZ 5W-1H PLAN DE ACCIÓN												
QUÉ WHAT			POR QUÉ WHY		CÓMO HOW				DONDE WHERE	QUIÉN WHO	CUANDO WHEN	
Id.	FACTOR CRÍTICO DE ÉXITO	Id.	PROCESO DE DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS DE EJECUCIÓN PLAN DE ACCIÓN	Problemática	Metas	Actividades	Mecanismo de seguimiento	Barreras a superar	Resultado Esperado	Ubicación	Responsable	Plazo meses
2	Llevar un total control de la operación y mantenimiento del banco de pruebas	1	Implementación de bitácora diaria del banco de pruebas	Al requerir datos históricos diarios del banco de pruebas, no existe información consultable, es por ello que no se tiene un control de la operación del banco de pruebas	Implementación de software en donde se requiera ingresar datos de del banco antes y despues de cada prueba, coordinado con el BPMS de la empresa	Empresa contratista informática que está a cargo del BPMS, diseñará esta bitacora en línea para que los datos registrados vayan a una base de datos con toda esta información	Verificación de actividades por parte del ingeniero de gestión de servicio	Técnicos no ingresen los datos requeridos y se salten el proceso de prueba nuevo	Base de datos en línea con toda la información del uso del banco de pruebas actualizada	Sala banco de pruebas	Ingeniero de gestión de servicio	6
		2	Gestión de bodega en los repuestos críticos del banco de pruebas	No se tiene control de los repuestos críticos en el caso de una falla del banco de pruebas	Bodega debe tener total control de mantener el stock de repuestos disponible	Departamento de informática deberá interconectar ambos software y añadir alertas a los encargados de adquisiciones en el caso de que no exista el stock deseado de repuestos para el banco de pruebas	Verificación de actividades del Jefe de bodega	Por sobrecarga laboral, bodega no realice las gestiones para mantener el stock constante	Stock de repuestos críticos permanente	Bodega	Ingeniero de gestión de servicio	12
		3	Creación de KPI's de mantenimiento	No existe información de mantenimiento actualizada en la empresa como historial de fallas, tiempo medio entre fallas, por lo que es imposible tener valores concretos de tasa de fallas, confiabilidad, disponibilidad, entre otros	Implementación de subprograma de mantenimiento a partir del BPMS (APIA), para evidenciar registro de todas las actividades de mantenimiento	Empresa contratista informática que está a cargo del BPMS, implementará subprograma de mantenimiento para el registro de datos, con lo que se mostrarán los indicadores en un panel de control	Verificación de actividades por parte del gerente de servicio y proyectos	Técnico senior no ingresa datos de mantenimiento a plataforma computacional	Indicadores de mantenimiento fidedignos a partir de base de datos implementada	Taller hidráulico	Gerente de servicios y proyectos	18

Figura 7.2: Matriz 5W-1H para el plan de acción propuesto (parte 2). Fuente: elaboración propia en base a lo expuesto por el artículo “Las 5W + H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos” [13].

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

El objetivo general de este trabajo de título consistió en generar una propuesta de mejora del plan de mantenimiento para el banco de pruebas con la finalidad de mejorar el nivel de disponibilidad en el proceso productivo de la empresa de una manera sustentable. Con la realización del FMECA y RCM (capítulos 4 y 5), se obtiene una propuesta de mantenimiento que se enfoca en estos términos. Si realizamos una comparación con el plan de mantenimiento que existe en la empresa (capítulo 1), se nota claramente que existe una base teórica y técnica fuerte esta propuesta y por ello una mejora con respecto al plan existente, por lo que el objetivo general propuesto se cumple satisfactoriamente.

En el capítulo 3, se muestra toda la información del contexto y funcionamiento del banco de pruebas, así como también su estructura técnica de objeto. Además, tal como se menciona anteriormente, en el capítulo 1 se muestra el plan de mantenimiento actual y los datos históricos disponibles por la empresa, por lo que se cumple el primer objetivo específico. A raíz de esto, se nota que la política de mantenimiento no es un tema importante en la empresa, ya que no existen datos históricos de fallas, a pesar de que el banco de pruebas opera hace 16 años. Es por ello que nuevamente se confirma el objetivo general en el sentido de proponer una mejora.

En el capítulo 4, se realiza un análisis FMEA que luego, con la ayuda de un análisis de riesgo a partir del RPN, se obtiene la criticidad de cada modo de falla. Para su análisis, fue muy importante haber sido parte del proceso productivo de la empresa, ya que en la confección de informes técnicos de las reparaciones que se realizan, se adquiere mucho conocimiento de los modos de falla de todos los componentes internos de las distintas unidades hidráulicas. Además, al observar el proceso de evaluación, se comprende la importancia de que el fluido oleohidráulico debe mantenerse dentro del grado de limpieza recomendado por la norma ISO4406, ya que se visualizan los desgastes ocasionados por esta causa. Por otro lado, se presencia un incidente en la sala de pruebas, en donde por una desconexión del conector rápido de un flexible (debido a una falta de chequeo en la conexión), ocurre un modo de falla muy crítico (descone-

xión de flexible a alta presión), sin embargo, no tiene ningún tipo de consecuencias en el operario. Este modo de falla se debe a la causa de mala manipulación, el cual tiene mucha frecuencia en el análisis realizado en este capítulo.

Con toda esta información, sumado al análisis FMECA completo que se aprecia en el anexo C, se cumple satisfactoriamente el segundo objetivo específico.

En el capítulo 5 se aplica el filtro por riesgo al análisis FMECA, resultando una reducción de 317 a 201 modos de falla con el criterio descrito. Estos modos de falla críticos deben ser estudiados con mayor profundidad. Para ello se utiliza el método RCM, en donde gracias al diagrama de decisión, se puede obtener una tarea recomendada dadas las circunstancias de operación, poniendo énfasis a priorizar la seguridad y el impacto ambiental por sobre las consecuencias operacionales. Con esto se cumple parte del quinto objetivo en el sentido de evaluar el impacto ambiental y de seguridad operacional asociado a este plan.

Además, el RCM permite generar tareas de mantenimiento sin tener un conocimiento total y profundo del funcionamiento de los componentes. Se destaca que gracias al apoyo del equipo de trabajo, se logra un mejor entendimiento y por ende se obtienen tareas más adecuadas para el plan de mantenimiento.

Con todo esto, se genera una propuesta de mantenimiento con grandes mejoras respecto a lo que existe en la empresa, señalando tareas a realizar en intervalos dados, tal como se aprecia en el anexo E, por lo que se puede afirmar que se cumple el objetivo de elaborar un plan de mejora para el plan de mantenimiento acorde a la situación de la empresa considerando a las partes interesadas.

Con respecto a la disponibilidad del banco de pruebas, en el capítulo 5 se realiza una proyección en base al juicio experto de los técnicos que tienen mayor experiencia en el banco, con lo que se obtiene una disponibilidad numérica proyectada. Esta disponibilidad no es exacta, pero es una primera estimación para manejar un indicador en la empresa. En paralelo, la implementación de esta estrategia de mantenimiento abre la posibilidad de mejorar indirectamente la disponibilidad de los componentes del banco, por lo que se cumple el cuarto objetivo específico.

Con respecto al impacto económico (parte restante por cumplir del quinto objetivo específico), en el capítulo 6 se aplica el modelo económico propuesto por Meruane [2]. De esta aplicación se obtiene un costo correctivo de \$43.085.848 millones de pesos anuales y un costo preventivo de \$35.453.991 millones de pesos anuales. Se aprecia que el costo correctivo supera al costo preventivo. Esto se explica por el costo que significa tener detenciones no programadas (costo de ineficiencia). Sin embargo, el enfoque principal de este análisis es privilegiar la seguridad de los operarios por sobre los costos de mantenimiento. Además, estos costos se consideran como una inversión de capital que crea un gran beneficio (CAPEX) en la disponibilidad del banco de pruebas y por lo tanto, crea beneficios en la competitividad de la empresa, por lo cual se cumple el quinto objetivo específico completo.

Recomendaciones

Se recomienda implementar los planes de acción mostrados en el capítulo 7, sobre todo el uso inmediato de las hojas para el registro de mantenimiento y uso del banco del anexo G. Estos datos ayudarían muchísimo a tener una proyección de los costos del mantenimiento más real. Esto, debido a que es más exacto trabajar con análisis probabilísticos que van de la mano con el mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Para tener un mejor énfasis en el mantenimiento de la empresa, se recomienda la capacitación de todo el personal relativo al mantenimiento del banco en materias de RCM. Es necesario que todo el equipo de trabajo comprenda que los esfuerzos realizados al mantener los equipos son muy importantes para el desarrollo sustentable de la empresa.

Para analizar técnicamente los componentes críticos del banco de pruebas fue necesario aprender oleohidráulica mucho más allá de lo que se enseña en la Universidad, sin embargo, gracias a la buena voluntad y ayuda de los técnicos de laboratorio, se aprende muy rápido, lo que contribuye a un mejor entendimiento de la lógica de funcionamiento. Por otro lado, es sabido que en la gran minería o en gran parte de las empresas productivas existe un gran número de equipos oleohidráulicos, por lo que se recomienda darle más enfoque de la asignatura de Automatización impartida en la Universidad.

Se recomienda la realización de una nueva memoria respecto al mantenimiento del banco de pruebas, utilizando otras técnicas como el TPM, para comparar resultados e ir mejorando los intervalos de mantenimiento.

Bibliografía

- [1] John Moubray. RCM: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, edición en español. Asheville, North Carolina, USA: Aladon LLC, 2004.
- [2] Viviana Meruane. Gestión de Activos Físicos. Apuntes para el curso ME5701. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. Primera Edición, Santiago, 2011.
- [3] Raúl Stegmaier. Teoría de la Confiabilidad de Componentes y Sistemas. Departamento de Industrias de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2011.
- [4] INN Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh-ISO 31010, 2013.
- [5] SAE JA1011. Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes, 1999.
- [6] SAE JA1012. A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard, 2002.
- [7] International Electrotechnical Commission et al. IEC 60812: Analysis techniques for system reliability-Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), 2006.
- [8] J SAE. 1739. Potential FMEA Reference Manual, 2009.
- [9] H Exner, R Freitag, and H Geis. Fundamentos y componentes de la oleohidráulica Compendio 1, 1991.
- [10] ISO 4406. Hydraulic Fluid Power—Fluids—Method for Coding the Level of Contamination by Solid Particles, 1999.
- [11] José R Aguilar-Otero, Rocío Torres-Arcique, and Diana Magaña-Jiménez. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. Tecnología, Ciencia, Educación, 2010. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/49598317>.

- [12] Carlos Rivas C. “Plan de mejora de la gestión de procesos de un servicio técnico de componentes oleohidráulicos”, 2019.
- [13] Trias, Mónica and González, Patricia and Fajardo, Simone and Flores, Laura. Las 5 W+ H y el ciclo de mejora en la gestión de procesos. Innotec Gestion, (1 ene-dic):20–25, 2009.
- [14] MILSTD Military Standard. 721C. Definitions for Terms for Reliability and Maintainability, 1981.
- [15] British Standard. 3811:1984. Glossary of Maintenance Management Terms in Terotechnology”. British Standards Institution, London, 1984.
- [16] Maintenance AFNOR. Concepts et définitions des activités de maintenance. Norme NF X, 2010.

Anexo A

Documentos empresa

A continuación se muestran los documentos de mantenimiento utilizados actualmente por la empresa hidráulica.

A.1. Hoja de vida para registro de mantenimiento

Ver tabla A.1.

A.2. Registros de mantenimiento hasta la fecha

Ver tablas A.2 y A.3.

Talleres Lucas®		HOJA DE VIDA DEL EQUIPO		
Equipo		Modelo		
Ubicación				
Fecha	Trabajo efectuado	P	C	Observación

Nota: P = Mantenimiento Preventiva
C = Mantenimiento Correctiva

Tabla A.1: Hoja de vida utilizada actualmente para el mantenimiento de activos. (Fuente: Gerencia de servicios y proyectos de empresa.)

Solicitudes de Mtro.											
Nombre Solicitante	Área	Equipo	Modelo	Descripción Falla	Descripción Mtro	Mantenimiento Efectuada		Recepción mantenimiento			
						Nombre	Fecha	Nombre	Fecha		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Bomba	S4S E147		Se realiza mantenimiento por horas cronológicas 1646hrs presentando buen rendimiento volumétrico. Próxim mantenimiento 2095hrs.	Renato Villavicencio	11-06-2018	Gerardo Cartagena	11-06-2018		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Bomba	S90	Se realiza la mantención al bco detectando en la bomba bajo rendimiento volumétrico según curva de fabricación. Se recomienda reparación por ser equipo crítico.		Renato Villavicencio	09-06-2018	Gerardo Cartagena	09-06-2018		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Bomba	S4S J30		Se realiza mantención de bomba por horas cronológicas (1646) de acuerdo al plan de mto. Presentando buen rendimiento y funcionamiento. (ver hoja de prueba). Próxima mantención a las 2095 hrs.	Renato Villavicencio	06-06-2018	Gerardo Cartagena	11-06-2018		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Motor Diesel		Se cambian elementos, filtros y trceptor debido a la humedad.	Se realiza mantención motor diesel por horas cronológicas 1646hrs, cambiando lo siguiente: Filtro de aire, aceite diesel, chequeo de fugas. Correas y conexiones en buenas condiciones. Siguiendo mantención a los 2095hrs.	D. Blankevoort	31-10-2017	Gerardo Cartagena	03-11-2017		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas			Se realiza inspección y revisión por horas cronológicas 1020, realizando respries y cambio de aceite, filtros.	Roberto Aedo	08-08-2017	Gerardo Cartagena	03-11-2017		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza mantención por calendario 1020 hrs	D. Blankevoort	08-08-2017	Gerardo Cartagena	08-08-2017		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Estanque hidrostático		Fugas tapa superior del estanque se cambiara cinta de sellado.		Roberto Aedo	03-05-2017	D. Blankevoort	03-05-2017		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Filtros			Se realiza la mantención preventiva de los filtros de retornos que se encuentran en la tapa del estanque	Roberto Aedo	03-05-2017	D. Blankevoort	03-05-2017		
Roberto Aedo	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza mantención de filtros de motor (filtro aceite)	D. Blankevoort	03-05-2017	Roberto Aedo	03-05-2017		
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Bba. Pistones	S4S	Bombas de pistones bajo rendimiento volumétrico.	Mantenimiento correctiva.	Jonathan Ríos	03-11-2016	Rodrigo Izquierdo	07-11-2016		
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Estanque hidrostático	DS 60	Se cambia por saturación de succión debido a la contaminación.	Correctiva	D. Blankevoort	02-11-2016	Rodrigo Izquierdo	02-11-2016		
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Estanque Banco	DS 60	Nivel bajo de aceite, se rellena para corregir.	Correctiva	D. Blankevoort	02-11-2016	Rodrigo Izquierdo	02-11-2016		
D. Blankevoort	Sala Diesel	Bomba cc	S 90	Nivel de aceite	Zoltr 68 ISO	D. Blankevoort	27-09-2016	D. Blankevoort	27-09-2016		
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	DET60D90-51-45	Se realiza la mantención del banco de pruebas en el cual se revisan: Filtro, elementos manómetros y equipo en general. Sin necesidad de hacer cambios, solo chequeos.	Preventiva	D. Blankevoort	05-09-2016	Rodrigo Izquierdo	05-09-2016		

Tabla A.2: Registros de todos los mantenimientos realizados al banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia en base a levantamiento de datos.)

D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	DET60SD90-S1-45		Se realiza la mantención del banco de pruebas en el cual se revisan: Filtro, elementos manómetros y equipo en general. Sin necesidad de hacer cambios, solo chequeos.	Preventiva	D. Blankevoort	05-09-2016	Rodrigo Izquierdo	05-09-2016
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza mto por horas cronológicas, realizando cambio de aceite motor, revisión de filtros de aire, petróleo e inspecciones visuales en general. Además inspección al sistema eléctrico.	Preventiva	D. Blankevoort	05-09-2016	D. Blankevoort	05-09-2016
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Falla alternador.	Cambio alternador. correctiva	D. Blankevoort	01-08-2016	D. Blankevoort	01-08-2016
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	DET60SD90-S1-45		Manguera con fugas, llenar aceite ISO37	Cambio mangueras R4-2" + abrazadera tambor 206 Hr. ISO 37 aceite. (correctivo)	D. Blankevoort	21-07-2016	Rodrigo Izquierdo	21-07-2016
Cristian Toro	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza mantención a motor reemplazando filtros de aceite y aire, además cambio de aceite y limpieza general. (512hrs)		Arturo Becerra	21-06-2016	Rodrigo Izquierdo	21-06-2016
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	DET60SD90-S1-45		Falla de válvula de carga 2	Cambio Válvula de carga (correctivo)	D. Blankevoort	15-06-2016	Rodrigo Izquierdo	15-06-2016
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Filtros	Filtro 590		Cambio filtros y revisión de instrumentos	Preventiva	D. Blankevoort	15-03-2016	Rodrigo Izquierdo	15-03-2016
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza relleno de aceite motor por nivel bajo	Correctiva	D. Blankevoort	22-12-2015		
D. Blankevoort	Bco. Pruebas	Valvulas filtros			Cambio Valve offline, filtros offline, filtro carga 3	Correctiva	Arturo Becerra	01-12-2015	Rodrigo Izquierdo	01-12-2015
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza relleno de aceite motor por nivel bajo	Correctiva	D. Blankevoort	16-11-2015		
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza instalación de horómetro nuevo por cambio de motor diesel	Correctiva	Arturo Becerra	15-10-2015	Rodrigo Izquierdo	15-10-2015
Cristian Toro	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	Horómetro		Se realiza cambio de filtros, análisis de aceite, sistema eléctrico. Se encuentra todo OK y trabajando.	Correctiva	Daniel Agurto	30-09-2015	Guillermo Flores	30-09-2015
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	DET60SD90-S1-45		Se realiza cambio de motor diesel por presentar problema de baja eficiencia	Preventiva	C.Toro-P.Carrasco	18-08-2015	Guillermo Flores	10-08-2015
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Carga de combustible	Correctiva	Arturo Becerra	27-06-2015	Guillermo Flores	27-06-2015
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Se realiza inspección por horómetro (3100hrs) a banco realizando reemplazo de filtros, análisis de aceite, revisión de bombas y sistema eléctrico. Además se revisan, tester e instrumentación general. Todo se encuentra operando sin problemas. Prox mantención 3550 hrs.	Preventiva	Arturo Becerra	09-05-2015	Rodrigo Izquierdo	09-05-2015
Cristian Toro	Bco. Pruebas	Bco. Pruebas	DET60SD90-S1-45		Carga de combustible	Preventiva	C.Toro	01-05-2015	Guillermo Flores	01-05-2015
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Carga de combustible	Preventiva	Arturo Becerra	03-03-2015	Rodrigo Izquierdo	03-03-2015
Guillermo Flores	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Carga de combustible	Preventiva	Arturo Becerra	23-01-2015	Rodrigo Izquierdo	23-01-2015
Cristian Toro	Bco. Pruebas	Motor Diesel	DS 60		Mantenimiento preventivo por cumplimiento de horas. Se reemplazan filtros de combustible, aceite motor y filtro de aire.	Preventiva	Cristian Toro	22-12-2014	Arturo Becerra	22-12-2014

Tabla A.3: Registros levantados de todos los mantenimientos realizados al banco de pruebas (continuación).

Anexo B

Banco de pruebas

A continuación se muestran los diagramas hidráulicos realizados con software CAD de acuerdo a los distintos sistemas.

B.1. Vista general del banco de pruebas

Ver figura B.1.

B.2. Sistema 1: Prueba de bombas, divisores de flujo y toma fuerza

Ver figura B.2.

B.3. Sistema 2: Prueba de motores y comandos de válvula

Ver figura B.3.

B.4. Sistema 3: Prueba de orbitroles y cilindros

Ver figura B.4.

B.5. Sistema 4: Sistema de trasvasije y enfriamiento

Ver figura B.5.

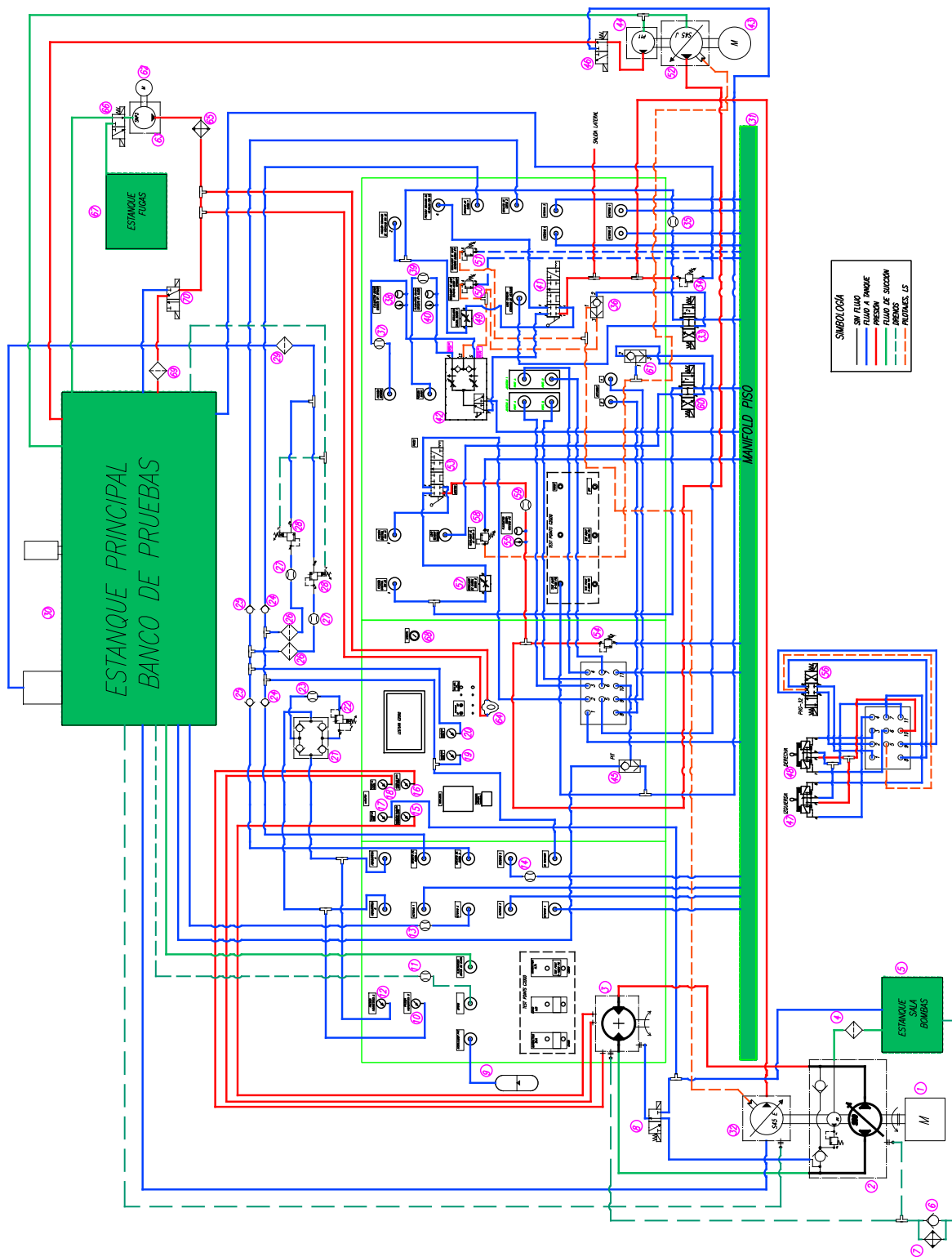


Figura B.1: Vista general del levantamiento al banco de pruebas hidráulico. (Fuente: Elaboración propia)

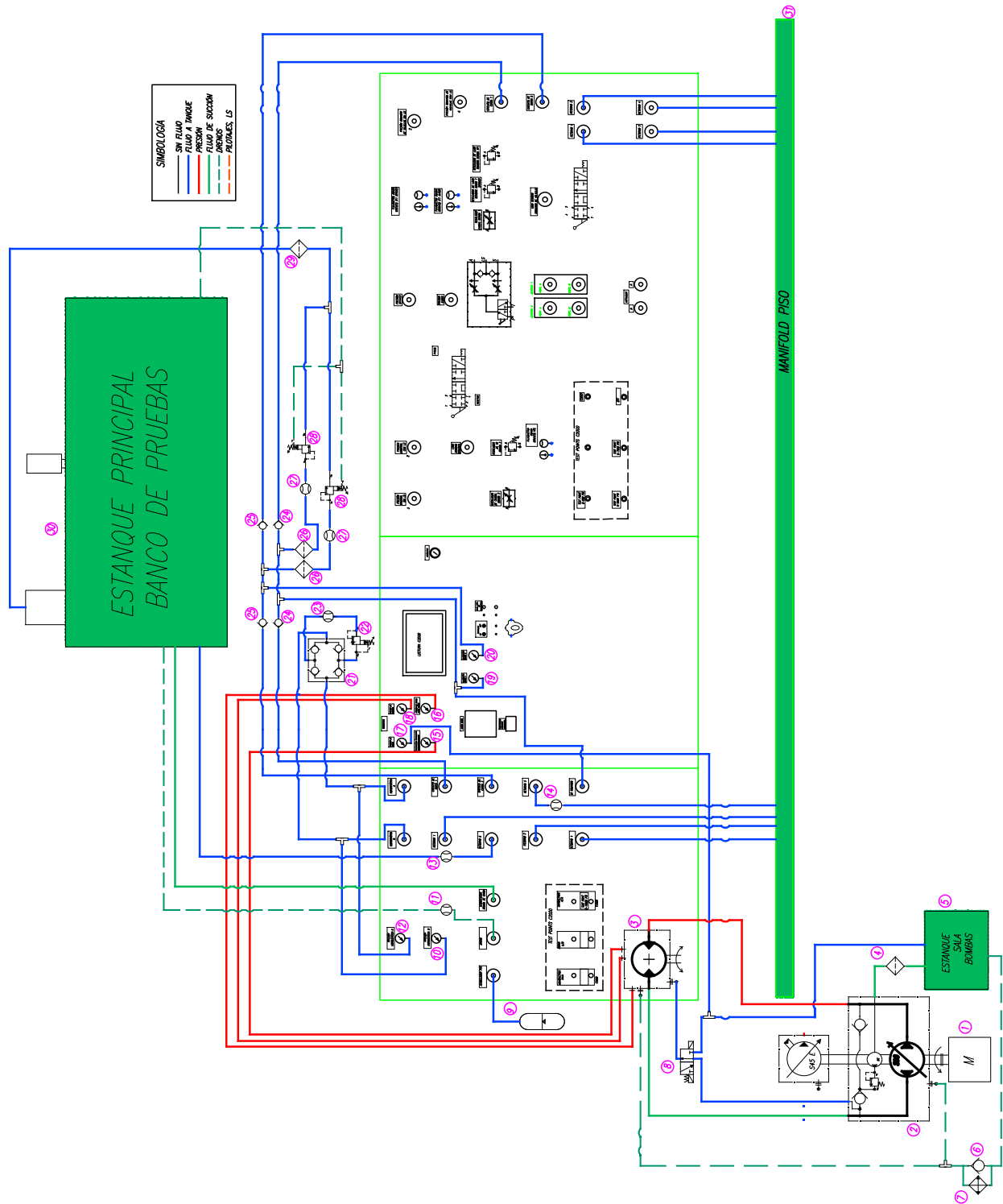


Figura B.2: Sistema de prueba de bombas, divisores de flujo y toma fuerza de acuerdo a los datos levantados en el banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia)

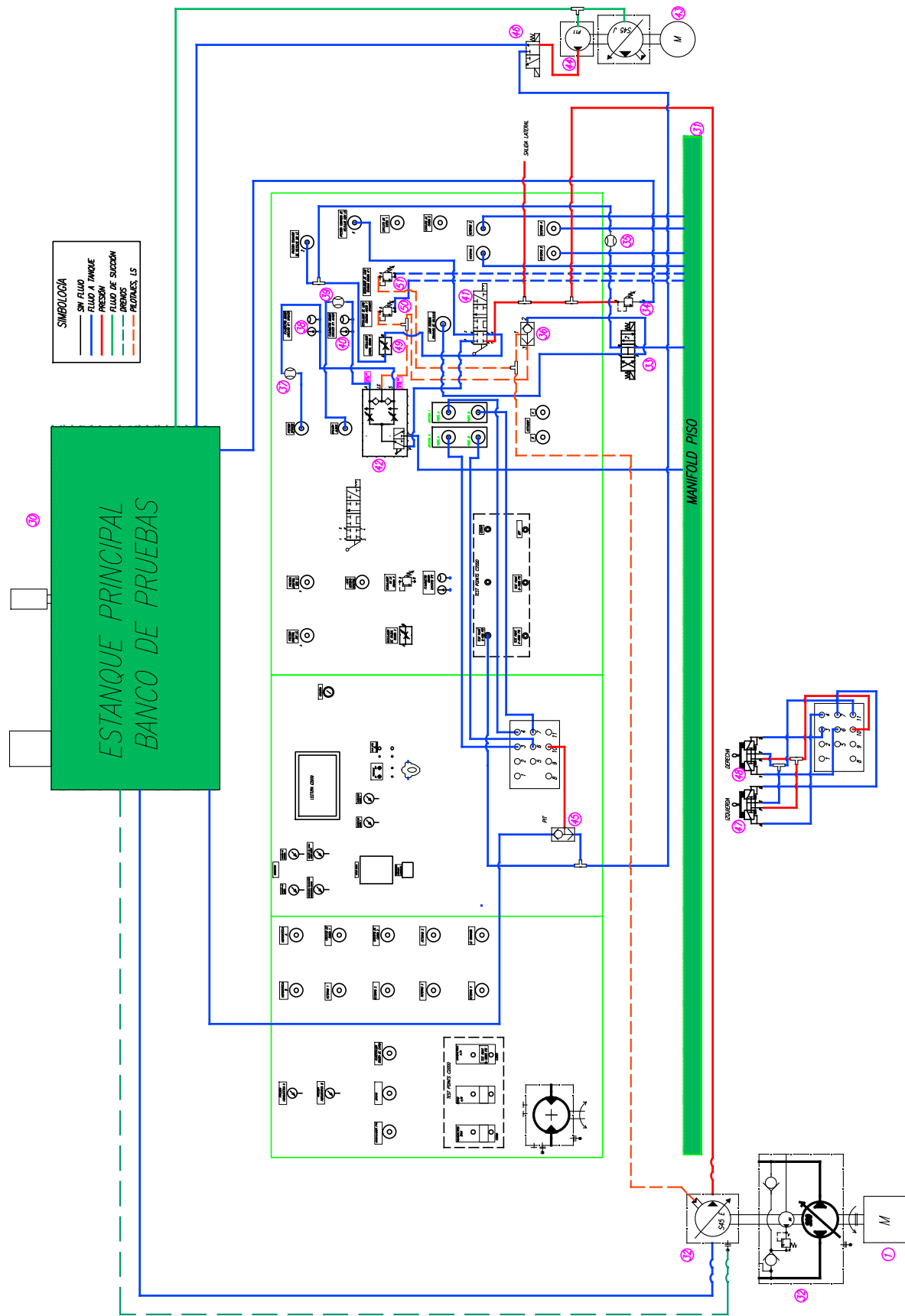


Figura B.3: Sistema de prueba de motores, comandos de válvula de acuerdo a los datos levantados en el banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia)

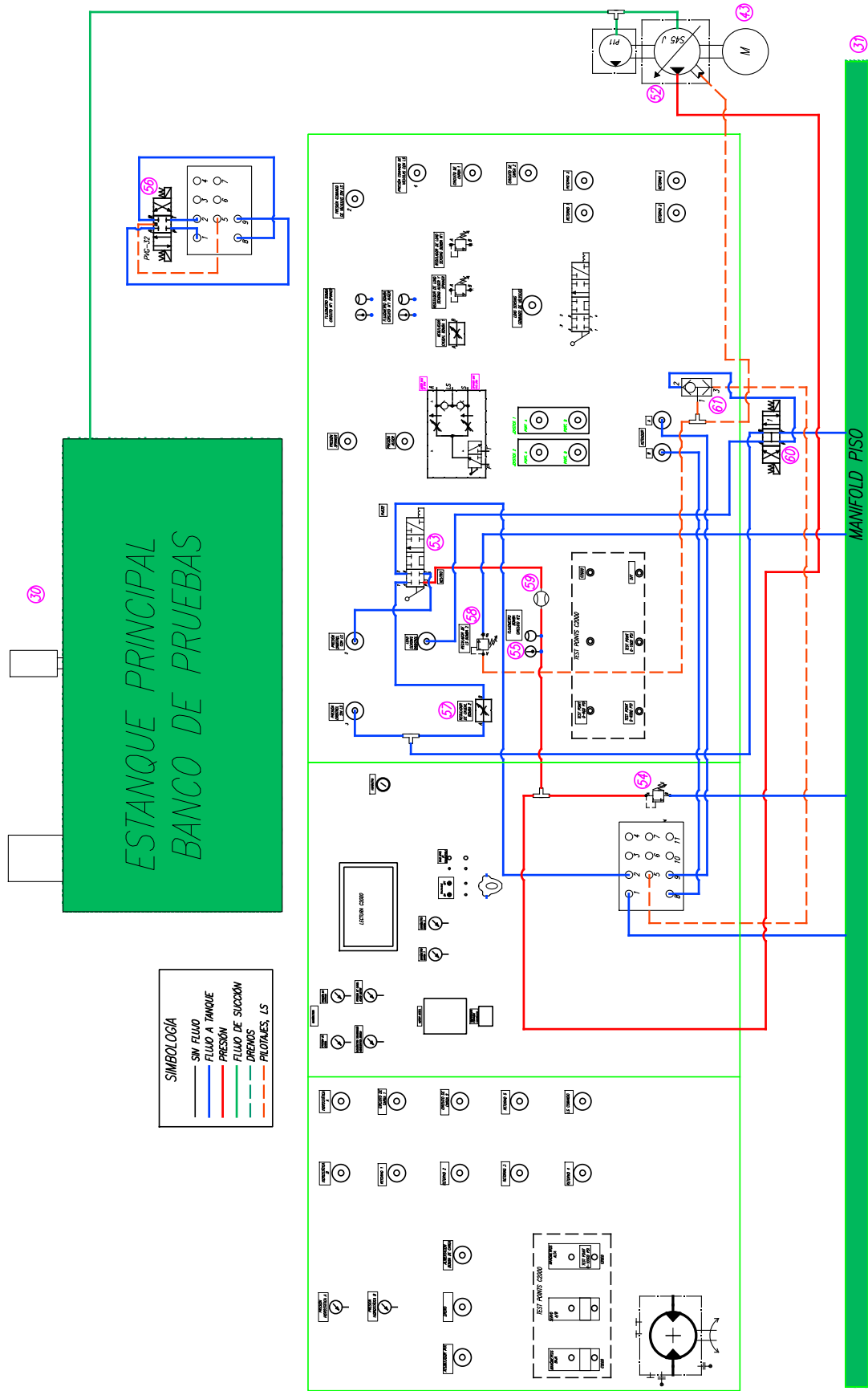


Figura B.4: Sistema de prueba de orbitales y cilindros de acuerdo a los datos levantados en el banco de pruebas. (Fuente: Elaboración propia)

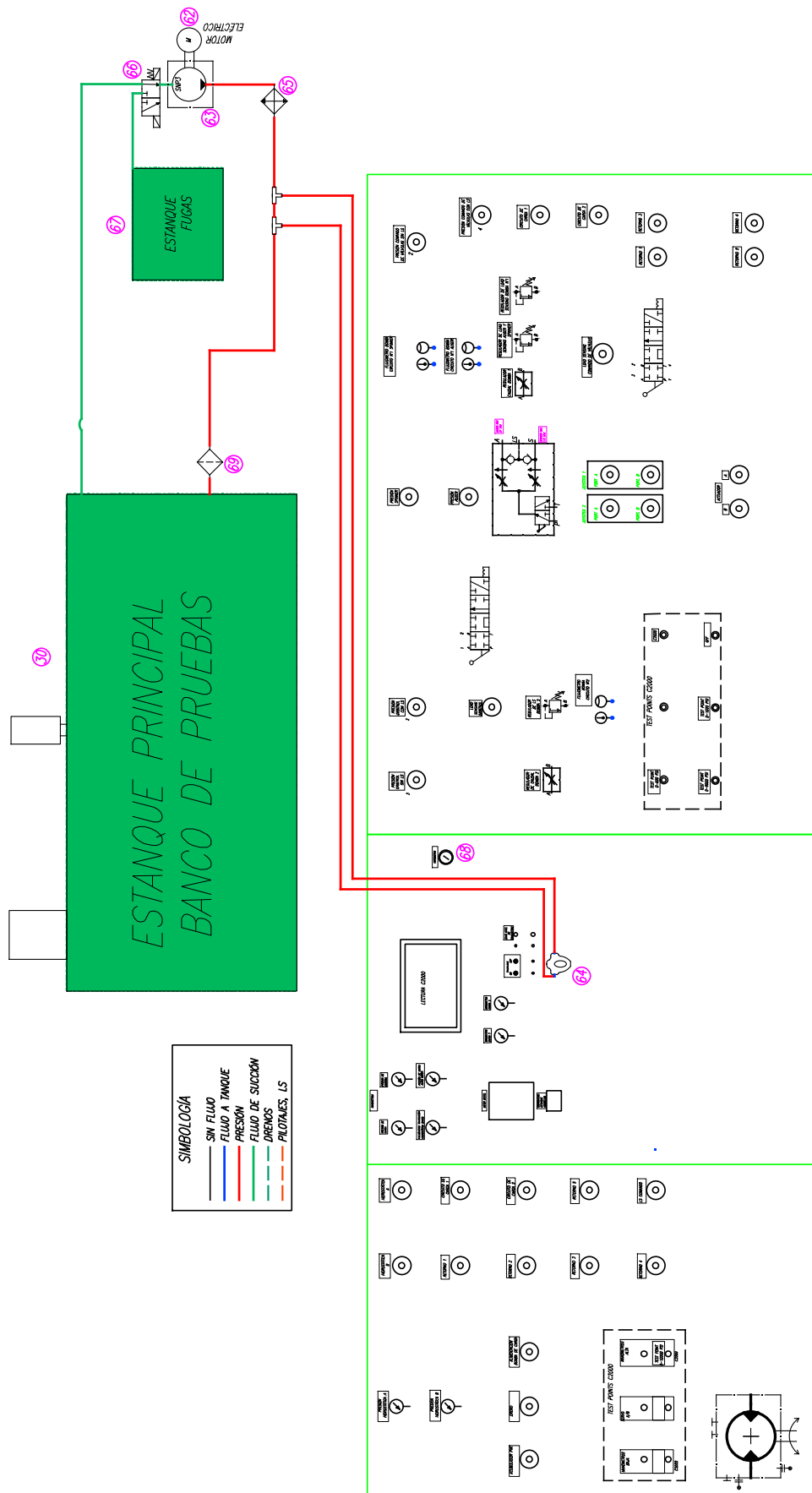


Figura B.5: Sistema de trasvasije, conteo de partículas y enfriamiento. (Fuente: Elaboración propia)

Anexo C

FMECA

Se presenta la totalidad de componentes evaluados en el análisis FMECA.

C.1. Sistema 1

Ver tablas C.1, C.2, C.3, C.4, C.5 y C.6.

C.2. Sistema 2

Ver tablas C.7, C.8, C.9 y C.10.

C.3. Sistema 3

Ver tabla C.11.

C.4. Sistema 4

Ver tabla C.12.

C.5. Sistema 5

Ver tablas C.13 y C.14.

ID.	COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFEECTO DE FALLA	CAUSAS DE FALLA		CONTROL DE DETECCIÓN	D	RPN		
		Verbo+objeto+estandar funcionamiento	Verbo+estandar funcionamiento	Sustantivo + verbo	¿Que ocurre?	S	¿Por qué ocurre?	Causa potencial			O	¿Se puede detectar modo de falla, antes de que tenga consecuencias, con que?
1	Motor diesel	1 Entregar RPM a bombas hidráulicas	A Incapaz de entregar RPM	1 No hay combustible en el tanque	El motor se queda sin combustible, por lo que es imposible realizar la combustión, y por ende se detiene el motor	2	No se revisa el nivel del tanque de combustible	Falta de inspección visual	5	Indicador del nivel en el banco de pruebas	2	20
				2 Filtro de combustible tapado	El motor se queda sin paso de combustible	8	Filtro saturado impide paso de combustible	Suciedad en filtro	3	Revisión por mantenimiento programado	3	72
				3 Línea de combustible cortada	El motor se queda sin funcionar y hay derrame de combustible	8	Desgaste excesivo en línea de combustible	Desgaste línea combustible	2	No hay	7	112
			B Entrega bajas RPM	1 Deformación de álabes turbocompresor	El volumen de aire hacia los cilindros es menor que el requerido, la combustión es incompleta y el motor pierde potencia	6	Suciedad en el aire de admisión, filtros en mal estado	Suciedad en filtro	3	Tacómetro motor diesel	3	54
				2 Inyectores sucios	La mezcla aire combustible no es en la razón correcta, por lo que se pierde la eficiencia del motor	7	Combustible contaminado	Suciedad en filtro	4	ECU	2	56
				3 Stall del motor	El motor se sobreexige al acoplar bomba de capacidad superior a la de diseño del motor	7	Bomba sobredimensionada con respecto al motor	Mal diseño	4	Baja en tacómetro, aumento temperatura	2	56
		4 Sellos deteriorados		Fugas y pérdidas de eficiencia en el conjunto motor	7	Exceso de operación sin mantenimiento	Vida útil superada	3	Revisión por mantenimiento programado	2	42	
		5 Desgaste en camisa de cilindros y anillos de pistones		Baja en el funcionamiento del motor hasta su detención	8	La cámara de combustión permite el paso de fluidos de lubricación por lo cual no es posible el funcionamiento correcto de los pistones	Falta de mantenimiento	2	Revisión por mantenimiento programado	2	32	
		6 Rodamientos agripados	El eje no puede funcionar libremente	7	Alta humedad y corrosión	Vida útil superada	3	Tacómetro motor diesel	2	42		
		2 Cumplir normativa ambiental en los gases de escape	A Emisión de altos niveles de gases contaminantes	1 Baja compresión	La mezcla aire combustible no se comprime como debe, lo cual genera	6	Desgaste en anillos, válvula de admisión mal regulada	Falta de mantenimiento	2	ECU	3	36
				2 Filtro de aire obstruido	Emisión de gases contaminantes	7	Combustión incompleta	Suciedad en filtro	3	Olor	3	63
		3 Mantener la seguridad operacional	A Operación sin estándares de seguridad	1 Rotura de rodamientos	Desalineación de eje y vibraciones excesivas	7	Operación con componente dañado	Vida útil superada	2	Ruidos excesivos	2	28
				2 Fugas excesivas de refrigerante	La película de aceite al aumentar la	8	Sellos en mal estado	Vida útil superada	4	Termómetro ECU	5	160

Tabla C.1: Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 1).

2	Bomba de pistones axiales S90	1 Entregar caudal a sistemas	A No entregar caudal	3	Bajo nivel de refrigerante	Aumento de temperatura del motor por no contar con el refrigerante	8	Nula inspección del nivel de refrigerante	Falta de inspección visual	4	Termómetro ECU	5	160	
				1	Corte en línea de aspiración	No entra fluido a la bomba	8	Desgaste excesivo en flexibles	Falta de inspección visual	2	No hay	8	128	
				2	Carcasa destruida	No se logra estanqueidad en la bomba	8	Peak de presión por falla de compensador	Peak de presión	1	No hay	7	56	
				3	Pistones destruidos	Destrucción interna de componentes y mal funcionamiento	8	Aceite contaminado y operación constante	Aceite contaminado	4	Ruidos excesivos	3	96	
				4	Eje dañado en zona de acople	Bajas o nulas RPM desde motor diesel/eléctrico	7	Incorrecto montaje y operación	Mala manipulación	5	No hay	4	140	
				5	Nula basculación	No existe basculación de plato y por ende no hay desplazamiento en los pistones	8	Servo pistón con desgaste excesivo por aceite contaminado	Aceite contaminado	4	Código ISO alto	2	64	
				6	Corte en la línea de presión	El fluido escapa al ambiente con alta presión y	9	Operación con flexibles en mal estado	Vida útil superada	3	Pérdidas de aceite	3	81	
			7	Bomba de carga dañada	La bomba principal es incapaz de llenar su volumen con fluido hidráulico	7	Desgaste excesivo por aceite contaminado	Aceite contaminado	4	Ruidos excesivos	2	56		
			B Entrega caudal insuficiente al sistema	1	Fugas en sellos	Pérdidas de fluido en la bomba	7	Operación con vida útil superada	Vida útil superada	5	Gotas de aceite	3	105	
				2	Rodamientos agripados	Dificultad para girar el eje sobre los descansos de la	6	Operación con vida útil superada	Vida útil superada	4	Ruidos	2	48	
				3	Alivio a baja presión	La bomba libera el fluido a baja presión y no se obtiene el	6	Ajuste erróneo de la válvula de alivio	Incorrecto ajuste	2	No hay	8	96	
				4	Desplazamiento insuficiente	Plato basculante no realiza el cambio de desplazamiento	7	Servopistón con desgaste por aceite contaminado	Aceite contaminado	5	Código ISO alto	3	105	
			C Caudal excesivo	1	RPM excesivas a la entrada de la bomba	La bomba esta entregando mayor caudal del que debe	6	Mala selección de unidad motriz	Mal diseño	1	No hay	8	48	
		1		Entregar caudal sin riesgos operacionales	A Bomba opera riesgadamente	1	Rodamientos dañados	Bomba tiene exceso de vibraciones	7	Operación con vida útil superada	Vida útil superada	3	Ruidos excesivos	3
		2	Cavitación en componentes internos	Bomba presenta exceso de ruidos en su funcionamiento		7	Cavitación	Incorrectas condiciones de operación	4	Ruidos excesivos	4	112		
		3	Rotura de carcasa en operación	El fluido a alta presión se libera rápidamente al ambiente		10	Peak de presión en conjunto con fisuras de carcasa	Peak de presión	1	No hay	8	80		
		4	Rotura de pernos de	Rotura de pernos cuando bomba se		9	Corrosión en pernos	Corrosión	1	Rutina de manter	4	36		
		1	Entregar RPM a bombas hidráulicas en prueba	A Incapaz de entregar RPM	1	Corte en línea de entrada	No entra fluido al motor	8	Desgaste excesivo en flexibles	Falta de inspección visual	2	No hay	8	128
					2	Carcasa destruida	No se logra estanqueidad en el motor	9	Peak de presión en conjunto con fisuras de carcasa	Peak de presión	2	No hay	8	144

Tabla C.2: Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 2).

3	Motor de pistones axiales		B	Entrega bajas RPM	3	Pistones destruidos	Destrucción interna de componentes y mal funcionamiento	8	Aceite contaminado y operación constante	Aceite contaminado	4	Ruidos excesivos	2	64		
					4	Desacople machón con eje	La bomba no recibe RPM desde el motor	7	Incorrecto montaje	Mala manipulación	3	No hay	7	147		
					1	Eje dañado en zona de acople	Bomba en prueba no recibe suficientes RPM para funcionar	7	Incorrecto montaje y operación	Mala manipulación	5	Datalogger no lee	2	70		
					2	Bajo caudal de entrada	Motor no entrega las RPM necesarias a bomba	7	Fuga en flexibles	Falta de inspección visual	2	No hay	8	112		
					3	Exceso de fugas internas	Dreno muy alto genera bajas RPM hacia la bomba	7	Desgaste en componentes internos	Aceite contaminado	3	Tacómetro	3	63		
		2	Entregar RPM sin riesgos operacionales	A	Operar riesgosamente	1	Rodamientos dañados	Motor tiene exceso de vibraciones	6	Operación con vida útil superada	Vida útil superada	2	Ruidos excesivos	2	24	
						2	Motor pierde estanqueidad a	El fluido a alta presión se libera	9	Flexible suelto	Mala manipulación	6	No hay	9	486	
						3	Rotura de pernos de	Rotura de pernos cuando motor se	9	Pernos con alta corrosión	Corrosión	1	Rutina de manter	4	36	
		4	Filtro	1	A	Filtro no atrapa impurezas del fluido	1	Filtro saturado	El fluido pasa libremente sin ser filtrado lo que genera suciedad en todo el circuito	6	Filtro en operación fuera de su capacidad de filtrado	Filtro saturado	4	Código ISO alto	3	72
							2	Filtro destruido	El fluido pasa libremente y se contamina con las	7	Filtro utilizado excesivamente sin reemplazo	Vida útil superada	3	Código ISO alto	3	63
2	Mantener integridad mientras esta			B	Filtro se deforma en la operación	1	Torsión del filtro	El filtro se deforma al hacer pasar exceso de caudal	7	Incorrectas condiciones de operación	Mal diseño	2	No hay	4	56	
5	Estanque sala de bombas	1	A	Pérdida de fluido hidráulico	1	Pérdida de sellado de estructura de estanque	El estanque constantemente pierde fluido hidráulico	7	Partículas contaminantes del aceite provocan corrosión en juntas	Corrosión	5	Código ISO alto	3	105		
					2	Sellos de conexiones a cañerías y flexibles en mal estado	Se producen fugas en las juntas lo que provoca pérdida de fluido al piso del banco de pruebas	7	Operación con vida útil superada	Vida útil superada	3	No hay	5	105		
		2	A	Presencia de agentes extraños en aceite del depósito	1	Respiradero obstruido	Se produce vacío al interior del estanque hidráulico, generando cavitación en bombas	7	Operación con vida útil superada	Vida útil superada	3	No hay	7	147		
					2	Filtro de retorno saturado	Se pierde la capacidad de filtración e ingresan agentes extraños al reservorio	6	Aceite contaminado en el sistema	Aceite contaminado	4	Código ISO alto	3	72		
6	Válvula check	1	A	Fluido pasa en ambos sentidos	1	Deformación asiento	El fluido pasa por ambos sentidos de circulación	6	Peak de presión interno provoca deformación	Peak de presión	2	No hay	6	72		
					2	Fisura del conjunto	El fluido escapa al ambiente con alta presión y temperatura	7	Peak de presión en provoca fisuras	Peak de presión	2	No hay	6	84		

Tabla C.3: Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 3).

7	Enfriador	1	Reducir la temperatura del fluido	A	Temperatura del fluido se mantiene alta	1	Motor de aspas defectuoso	Aspas giran lento o simplemente no giran, por lo cual es imposible generar la convección forzada deseada	6	Motor con pérdidas de aislación	Falla eléctrica	4	Giro lento de aspas, aumento de temperatura	5	120
						2	Baja eficiencia del intercambiador de calor	No se produce el intercambio de calor deseado y la temperatura del fluido baja levemente	8	Pérdida de capacidad de TDC de los materiales	Falta de mantenimiento	2	No hay	6	96
		2	Operación con nivel incierto de seguridad	B	Exceso de ruido en el enfriador	1	Desalineamiento del eje de las aspas	El funcionamiento del eje desalineado genera ruido al funcionar y puede cambiar el ángulo de las aspas pudiendo provocar un daño a las tuberías	6	Eje o rodamiento desalineado	Desalineación de eje	3	Ruido	2	36
8	Válvula direccional 3/2	1	Direccionar el flujo con todo el caudal disponible de acuerdo al pilotaje	A	Falta de estanqueidad de la válvula	1	Corrosión interna en componentes	Válvula tiene fugas externas hacia el ambiente	7	Aceite contaminado con exceso de agua	Aceite contaminado	2	Gotas de aceite	3	42
						2	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Pérdidas constantes de presión en los cuerpos de trabajo	7	Corrosión en spool	Corrosión	4	No hay	6	168
				B	Flujo no se direcciona por el pórtilo seleccionado	1	Desgaste excesivo en el spool	El fluido a presión se filtra a través de las cámaras y se direcciona en todos los pórtilos	7	Aceite contaminado provoca el desgaste	Aceite contaminado	5	Código ISO alto	3	105
						2	Control eléctrico en mal estado	Al realizar el accionamiento eléctrico no se mueve el spool, por lo que no pasa el fluido de la manera deseada	5	Solenoide quemado	Falla eléctrica	2	No hay	6	60
		2	Aliviar los peak de presión	A	No realizar el alivio de presión cuando se requiera	1	Compensador de presión en mal estado	Aumento de presión en las líneas al punto de generar una rotura	9	Pérdida de propiedades en el resorte	Falta de mantenimiento	2	No hay	7	126
						2	Spool compensador trabado en posición cerrado	No liberará presión la válvula, por lo que la presión en los cuerpos aumenta al borde de la rotura	9	Corrosión en spool	Corrosión	2	No hay	7	126
9	Acumulador	1	Acumular fluido hidráulico a presión desde la bomba PVK-140	A	No acumular el fluido desde la bomba PVK-140	1	Válvula de carga en mal estado	Al tener alta presión, la válvula de carga podría ceder y provocar una abrupta liberación de presión	8	Falta de mantenimiento	Falta de mantenimiento	3	No hay	8	192
						2	Rotura en bladder	Aceite de mezcla con nitrógeno y no es útil la compresibilidad del gas para mantener la presión de aceite	7	Condiciones de operación incorrectas	Mala manipulación	4	No hay	7	196

Tabla C.4: Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 4).

11	Flujómetro drenó	1 Medir caudal, presión y temperatura para los registros en el datalogger	A Medir erróneamente los datos requeridos	1 Contaminación en el sistema	La turbina se daña y presenta lecturas erróneas	8	Aceite contaminado en el sistema	Aceite contaminado	3	Código ISO alto	3	72
				2 Flujómetro descalibrado	Lecturas no reales	8	Incumplimiento de fecha de calibración	Falta de mantenimiento	7	Norma ISO	4	224
				3 Componentes sueltos	Provocan fugas y lecturas erróneas	7	Mala manipulación y golpes	Mala manipulación	4	Datalogger no lee datos	2	56
			B No medir parámetros	1 Componentes internos dañados	Impedimento de lectura de parámetros	8	Condiciones de operación incorrectas	Mala manipulación	3	Datalogger no lee datos	2	48
13	Flujómetro o retorno 2	VER COMPONENTE 11										
14	Flujómetro o retorno 5	VER COMPONENTE 11										
21	Conjunto válvulas check	VER COMPONENTE 6										
22	Válvula de carga hidrostática	1 Regular presión de acuerdo a lo solicitado para las pruebas	A No regular la presión (válvulas de carga) en pruebas hidráulicas	1 Resortes vencidos	Presión del fluido vence al resorte y no es posible efectuar la regulación o aumento de carga	8	Falta de mantenimiento según fabricante	Falta de mantenimiento	2	No hay	8	128
				2 Solenoide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Mal funcionamiento de la regulación de la válvula de carga mediante los potenciómetros. No se tiene precisión de regulación	7	Solenoide en mal estado o quemado	Falla eléctrica	5	Regulaciones erróneas mediante el potenciómetro	2	70
				3 Perno regulador agripado	Dificultad para girar perno regulador de presión manualmente lo cual no permite dicha regulación	7	Corrosión en perno	Corrosión	4	Dificultad de movimiento	2	56
				4 Asiento o poppet con desgaste excesivo	Presión permanentemente se fuga por las cavidades de desgaste	7	Desgaste excesivo por aceite contaminado	Aceite contaminado	4	No hay	8	224
				5 Resortes agarrotados	La presión no vence la fuerza del resorte y por ende sigue aumentando	9	Exceso de operación con aceite contaminado y corrosión	Aceite contaminado	2	No hay	8	144
23	Flujómetro hidrostático	VER COMPONENTE 11										
24	Válvula check circuito abierto 1	VER COMPONENTE 6										
25	Válvula check circuito abierto 2	VER COMPONENTE 6										

Tabla C.5: Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 5).

26	Filtros circuito abierto	VER COMPONENTE 4													
27	Flujómetros circuito abierto	VER COMPONENTE 11													
28	Válvulas de carga circuito abierto	VER COMPONENTE 11													
29	Filtro circuito abierto	VER COMPONENTE 4													
30	Estanque principal banco de pruebas	VER COMPONENTE 5													
31	Manifold de piso	1	Distribuir o recibir la totalidad del fluido que circula en las pruebas hidráulicas	A	Incapacidad de distribuir o recibir el fluido hidráulico	1	Manifold Obstruido	Fluido hidráulico no puede circular libremente por el circuito	6	Exceso de contaminación	Aceite contaminado	2	Código ISO alto	2	24
						2	Manifold de recepción con roturas	Fluido hidráulico se pierde en gran cantidad al ambiente con alta presión	9	Golpes y peak de presión	Mala manipulación	1	Pérdidas de aceite visibles	2	18
				B	Fugas en la distribución o recepción	1	Juntas o sellos en mal estado	Fluido hidráulico se fuga por las cavidades y se pierde en el ambiente.	6	Falta de mantenimiento en sellos o juntas	Falta de mantenimiento	6	Pérdidas de aceite visibles	2	72

Tabla C.6: Análisis FMECA para el sistema 1 (parte 6).

ID.	COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTO DE FALLA	CAUSAS DE FALLA			CONTROL DE DETECCIÓN		D	RPN	
		Verbo+objeto+estandar funcionamiento	Verbo+estandar funcionamiento	Sustantivo + verbo	¿Que ocurre?	S	¿Por qué ocurre?	Causa potencial	O	¿Se puede detectar modo de falla, antes de que tenga consecuencias, con que?			
32	Bomba de pistones axiales S45	VER COMPONENTE 2											
33	Electroválvula direccional 4/3	VER COMPONENTE 8											
34	Válvula liberadora de presión	VER COMPONENTE 22											
35	Flujómetro	VER COMPONENTE 11											
36	Válvula selectoras (OR)	1 Seleccionar el paso entre dos flujos de acuerdo a la presión	A Permitir paso del flujo por zona de bloqueo	1	Deformación asiento	El fluido fuga por el asiento y bola de la válvula selectora	7	Peak de presión provoca deformación	Peak de presión	2	No hay	6	84
				2	Fisura del conjunto	El fluido escapa al ambiente con alta presión y temperatura	9	Fisura por peak de presión	Peak de presión	2	No hay	8	144
				3	Desgaste en sellos	El fluido fuga por las conexiones de flexibles o cañerías	5	Exceso de operación sin mantenimiento	Falta de mantenimiento	3	No hay	7	105
37	Flujómetro	VER COMPONENTE 11											
39	Flujómetro	VER COMPONENTE 11											
41	Válvula distribuidora a 4 posiciones	VER COMPONENTE 8											
42	Control de flujo AUGER-SPINNER	1 Dividir y regular por separado el flujo	A Mezclar los flujos de salida	1	Desgaste excesivo en el spool	El fluido a presión se filtra a través de las cámaras y no se divide de manera correcta	6	Aceite contaminado en el sistema	Aceite contaminado	4	Código ISO alto	3	72
				2	Deformación asiento	El fluido se filtra por ambos pórticos de salida a través de las válvulas check	7	Deformación de asiento por alta presión	Peak de presión	2	No hay	6	84
			B No regular el caudal de los flujos de salida	1	Desgaste en asiento	El caudal no se restringe como debe ser, sino que fuga por cavidades de desgaste	7	Exceso de contaminación fluido	Aceite contaminado	3	Código ISO alto	3	63

Tabla C.7: Análisis FMECA para el sistema 2 (parte 1).

ID.	COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTO DE FALLA	CAUSAS DE FALLA		CONTROL DE DETECCIÓN	D	RPN
		Verbo+objeto+estandar funcionamiento	Verbo+estandar funcionamiento	Sustantivo + verbo	¿Que ocurre?	S	¿Por qué ocurre?	Causa potencial		
62	Motor eléctrico	VER COMPONENTE 43								
63	Bomba de engranajes	VER COMPONENTE 44								
65	Enfriador	VER COMPONENTE 7								
66	Válvula 3/2	VER COMPONENTE 8								
67	Estanque de fugas	VER COMPONENTE 5								
69	Filtro de retorno	VER COMPONENTE 4								

Tabla C.12: Análisis FMECA para el sistema 4.

ID	COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTO DE FALLA	CAUSAS DE FALLA		CONTROL DE DETECCIÓN	D	RPN			
		Verbo+objeto+estandar funcionamiento	Verbo+estandar funcionamiento	Sustantivo + verbo	¿Que ocurre?	S	¿Por qué ocurre?	Causa potencial			O	¿Se puede detectar modo de falla, antes de que tenga consecuencias, con que?	
70	Datalogger	1 Registrar los datos obtenidos de los flujómetros y transductores	A No registrar datos	1 Cables cortados	Falta de conexión con los instrumentos de medición	8	Condiciones ambientales del cable adversas	Falta de mantenimiento	2	Sin señal en Datalogger	3	48	
				2 Flujoómetro en mal estado	Datos erróneos	7	Falta de calibración y revisión de flujoómetro	Falta de mantenimiento	5	Informes con parámetros erróneos	5	175	
				3 Error de hardware	Imposibilidad de registrar datos	8	Problemas electrónicos	Problemas de hardware/software	3	Error en pantalla	2	48	
				4 Error de software	Imposibilidad de registrar datos	8	Error de licencia o virus	Problemas de hardware/software	3	Error en pantalla	2	48	
				5 Transductores en mal estado	Error en lectura de datos	8	Sobrepresión, sobrecarga o exceso de temperatura	Incorrectas condiciones de operación	5	Informes con parámetros erróneos	2	80	
71	Manifold de alimentación	VER COMPONENTE 31											
72	Flexibles	1 Transportar el fluido a los componentes sin pérdidas	A No transportar el fluido hidráulico	1 Corte de flexible	El fluido abandona el flexible a alta presión pudiendo provocar un accidente grave	9	Flexible en operación con vida útil cumplida	Vida útil superada	3	No hay	8	216	
				2 Obstrucción en el flexible	El flexible presenta agentes extraños en su interior por lo cual no deja circular el fluido	8	Acumulación de suciedad en el flexible	Aceite contaminado	2	Código ISO alto	2	32	
				B Perder fluido hidráulico constantemente	1 Flexible perforado	Fugas externas del fluido al ambiente	7	Desgaste excesivo del flexible por bajo mantenimiento	Vida útil superada	3	No hay	6	126
					2 Conexión se suelta del flexible	Liberación del fluido a presión y movimiento suelto de la manguera	10	Desgaste excesivo del flexible por bajo mantenimiento	Vida útil superada	2	No hay	8	160
					3 Fugas visibles por conectores	Pérdidas de fluido al ambiente en cantidades pequeñas	7	Desgaste en conectores	Vida útil superada	3	Goteos de aceite	3	63
		4 Flexible se suelta al ser sometido a presión	Movimientos bruscos y pérdida de aceite a alta presión al ambiente	10	Mala instalación	Mala manipulación	6	Supervisión de conexiones	5	300			
		2 Transportar el fluido con condiciones óptimas de seguridad	A Flexible con problemas visibles de seguridad	1 Flexible duro	Baja la flexibilidad del flexible y se vuelve frágil	7	Aceite aireado provoca oxidación	Aceite contaminado	3	Código ISO alto	2	42	
				2 Flexible con inflado localizado	Deformación del flexible	7	Exceso de temperatura	Alta temperatura	4	Termómetro temperatura de aceite	3	84	

Tabla C.13: Análisis FMECA para el sistema 5 (parte 1).

					3 Manguera erosionada internamente	Al tener erosión interna el flujo tiene muchas pérdidas de carga para el sistema	6	Acumulación de suciedad en el flexible	Aceite contaminado	2	No hay	7	84
73	Cañerías	1	Transportar el fluido	A No transportar el fluido hidráulico	1 Cañería cortada	Pérdida de fluido a alta presión	9	Deterioro por erosión de la cañería en conjunto con aceite contaminado constante	Aceite contaminado	2	No hay	7	126
		2	Transportar sin pérdidas de fluido	A Pérdidas de fluido por cañerías y juntas	1 Uniones mal selladas	Fugas de fluido al ambiente	7	Mala manipulación en conexiones anteriores	Mala manipulación	4	Goteos de aceite	2	56
74	Conectores	1	Ser el punto de conexión entre para los flexibles	A Niples no permiten la conexión	1 Niples deformados	Imposibilidad de conectar flexibles	8	Mala manipulación en conexiones anteriores	Mala manipulación	2	Inspección visual	2	32
					2 Niples destruidos	Fugas constantes de fluido hidráulico	7	Operación con componente dañado	Falta de mantenimiento	2	Inspección visual	2	28

Tabla C.14: Análisis FMECA para el sistema 5 (parte 2).

Anexo D

Análisis estadístico de los modos de falla

A continuación se presenta la totalidad de los modos de falla relacionados a sus causas potenciales y su componentes vistos en el capítulo-sección 4.2.2, correspondiente con el criterio de severidad mayor o igual a 6 y ocurrencia mayor o igual a 5. Ver tablas D.1, D.2, D.3 y D.4.

Componente	Modo de falla	Causa de falla
Motor diesel	Inyectores sucios	Suciedad en filtro
Motor diesel	Stall del motor	Mal diseño
Motor diesel	Fugas excesivas de refrigerante	Vida útil superada
Motor diesel	Bajo nivel de refrigerante	Falta de inspección visual
Bomba de pistones axiales S90	Pistones destruidos	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S90	Eje dañado en zona de acople	Mala manipulación
Bomba de pistones axiales S90	Nula basculación	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S90	Bomba de carga dañada	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S90	Fugas en sellos	Vida útil superada
Bomba de pistones axiales S90	Rodamientos agripados	Vida útil superada
Bomba de pistones axiales S90	Desplazamiento insuficiente	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S90	Cavitación en componentes internos	Incorrectas condiciones de operación
Motor de pistones axiales	Pistones destruidos	Aceite contaminado
Motor de pistones axiales	Eje dañado en zona de acople	Mala manipulación
Motor de pistones axiales	Motor pierde estanqueidad a alta presión	Mala manipulación
Filtro	Filtro saturado	Filtro saturado
Estanque sala de bombas	Pérdida de sellado de estructura de estanque	Corrosión
Estanque sala de bombas	Filtro de retorno saturado	Aceite contaminado
Enfriador	Motor de aspas defectuoso	Falla eléctrica
Válvula direccional 3/2	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Válvula direccional 3/2	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Acumulador	Rotura en bladder	Mala manipulación
Flujómetro drenó	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro drenó	Componentes sueltos	Mala manipulación
Flujómetro retorno 2	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro retorno 2	Componentes sueltos	Mala manipulación
Flujómetro retorno 5	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro retorno 5	Componentes sueltos	Mala manipulación
Válvula de carga hidrostática	Solenóide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Válvula de carga hidrostática	Perno regulador agripado	Corrosión
Válvula de carga hidrostática	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Flujómetro hidrostática	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro hidrostática	Componentes sueltos	Mala manipulación
Filtros circuito abierto	Filtro saturado	Filtro saturado
Flujómetros circuito abierto	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetros circuito abierto	Componentes sueltos	Mala manipulación
Válvulas de carga circuito abierto	Solenóide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Válvulas de carga circuito abierto	Perno regulador agripado	Corrosión
Válvulas de carga circuito abierto	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Filtros circuito abierto	Filtro saturado	Filtro saturado
Estanque principal banco de pruebas	Pérdida de sellado de estructura de estanque	Corrosión

Tabla D.1: Análisis estadístico de los modos de falla (parte 1).

Estanque principal banco de pruebas	Filtro de retorno saturado	Aceite contaminado
Manifold de piso	Juntas o sellos en mal estado	Falta de mantenimiento
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Pistones destruidos	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Eje dañado en zona de acople	Mala manipulación
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Nula basculación	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Bomba de carga dañada	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Fugas en sellos	Vida útil superada
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Rodamientos agripados	Vida útil superada
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Desplazamiento insuficiente	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Cavitación en componentes internos	Incorrectas condiciones de operación
Electroválvula direccional 4/3	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Electroválvula direccional 4/3	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Válvula liberadora de presión	Solenoides de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Válvula liberadora de presión	Perno regulador agripado	Corrosión
Válvula liberadora de presión	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Flujómetro	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro	Componentes sueltos	Mala manipulación
Flujómetro	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro	Componentes sueltos	Mala manipulación
Flujómetro	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro	Componentes sueltos	Mala manipulación
Válvula distribuidora 4 posiciones	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Válvula distribuidora 4 posiciones	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	Perno regulador agripado	Corrosión
Motor eléctrico	Machón de acople destruido	Mala manipulación
Motor eléctrico	Devanado abierto	Falla eléctrica
Motor eléctrico	Rodamientos en mal estado	Vida útil superada
Bomba de engranajes	Bomba sin alimentación	Mala manipulación
Bomba de engranajes	Placas de empuje pegadas	Falta de lubricación
Válvula direccional 3/2	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Válvula direccional 3/2	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado

Tabla D.2: Análisis estadístico de los modos de falla (parte 2).

Joystick 1 (izquierdo)	Spool trabado	Corrosión
Joystick 1 (izquierdo)	Spool con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Joystick 2 (derecho)	Spool trabado	Corrosión
Joystick 2 (derecho)	Spool con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Regulador LS Auger y Spinner	Solenoide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Regulador LS Auger y Spinner	Perno regulador agripado	Corrosión
Regulador LS Auger y Spinner	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Regulador LS bomba 1	Solenoide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Regulador LS bomba 1	Perno regulador agripado	Corrosión
Regulador LS bomba 1	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Pistones destruidos	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Eje dañado en zona de acople	Mala manipulación
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Nula basculación	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Bomba de carga dañada	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Fugas en sellos	Vida útil superada
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Rodamientos agripados	Vida útil superada
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Desplazamiento insuficiente	Aceite contaminado
Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Cavitación en componentes internos	Incorrectas condiciones de operación
Válvula distribuidora 4 posiciones	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Válvula distribuidora 4 posiciones	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Válvula liberadora de presión	Solenoide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Válvula liberadora de presión	Perno regulador agripado	Corrosión
Válvula liberadora de presión	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Comando PVG32	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Comando PVG32	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Reguladora de LS bomba 2	Solenoide de regulación no regula de acuerdo a lo solicitado	Falla eléctrica
Reguladora de LS bomba 2	Perno regulador agripado	Corrosión
Reguladora de LS bomba 2	Asiento o poppet con desgaste excesivo	Aceite contaminado
Flujómetro bomba circuito 2	Flujómetro descalibrado	Falta de mantenimiento
Flujómetro bomba circuito 2	Componentes sueltos	Mala manipulación
Electroválvula direccional 4/3	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Electroválvula direccional 4/3	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado

Tabla D.3: Análisis estadístico de los modos de falla (parte 3).

Motor eléctrico	Machón de acople destruido	Mala manipulación
Motor eléctrico	Devanado abierto	Falla eléctrica
Motor eléctrico	Rodamientos en mal estado	Vida útil superada
Bomba de engranajes	Bomba sin alimentación	Mala manipulación
Bomba de engranajes	Placas de empuje pegadas	Falta de lubricación
Enfriador	Motor de aspas defectuoso	Falla eléctrica
Válvula 3/2	Spool compensador trabado en posición abierto o semi abierto	Corrosión
Válvula 3/2	Desgaste excesivo en el spool	Aceite contaminado
Estanque de fugas	Pérdida de sellado de estructura de estanque	Corrosión
Estanque de fugas	Filtro de retorno saturado	Aceite contaminado
Filtro de retorno	Filtro saturado	Filtro saturado
Datalogger	Flujómetro en mal estado	Falta de mantenimiento
Datalogger	Transductores en mal estado	Incorrectas condiciones de operación
Manifold de alimentación	Juntas o sellos en mal estado	Falta de mantenimiento
Flexibles	Flexible se suelta al ser sometido a presión	Mala manipulación
Flexibles	Flexible con inflado localizado	Alta temperatura
Cañerías	Uniones mal selladas	Mala manipulación

Tabla D.4: Análisis estadístico de los modos de falla (parte 4).

Anexo E

Decisión RCM

A continuación se muestra la hoja de decisión RCM de acuerdo al análisis realizado en base al diagrama de decisión expuesto anteriormente.

E.1. Sistema 1

Ver tablas E.1, E.2,E.3 y E.4.

E.2. Sistema 2

Ver tablas E.5, E.6, E.7 y E.8.

E.3. Sistema 3

Ver tablas E.9, E.10 y E.11.

E.4. Sistema 4

Ver tablas E.12 y E.13.

E.5. Sistema 5

Ver tabla E.14.

REF. INFO.				EVAL. CONSECUENCIAS				H1/	H2/	H3/	ACCIÓN A FALTA DE			TAREA PROPUESTA	DETALLE TAREA	INTERVALO INICIAL	RESPONSABLE	
Id.	Componente	F	FF	FM	H	S	E	O	O1/	O2/	O3/	H4	H5					S4
1	Motor diesel	1	A	2	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de elemento filtro	450 h	Mantenimiento
1	Motor diesel	1	A	3	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual del nivel de combustible antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
1	Motor diesel	3	A	2	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
1	Motor diesel	3	A	3	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual del nivel de combustible antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	A	1	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de pistones y revisión de código ISO del aceite	450h	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	A	4	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	A	6	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	B	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	B	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión válvula de alivio y reajustar	450h	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	1	B	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de servo pistón, e inspección diaria del código ISO del aceite	450h	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	2	A	2	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar manómetro y ruidos excesivos	En operación	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	2	A	3	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
2	Bomba de pistones axiales S90	2	A	4	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
3	Motor de pistones axiales	1	A	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	Mantenimiento
3	Motor de pistones axiales	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
3	Motor de pistones axiales	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
3	Motor de pistones axiales	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento

Tabla E.1: Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 1).

3	Motor de pistones axiales	1	B	2	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	Mantenimiento
3	Motor de pistones axiales	2	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	Mantenimiento
3	Motor de pistones axiales	2	A	3	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	6 meses	Mantenimiento
4	Filtro	1	A	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento
5	Estanque sala de bombas	1	A	1	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
5	Estanque sala de bombas	1	A	2	S	S	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
5	Estanque sala de bombas	2	A	1	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de respiradero	450h	Mantenimiento
5	Estanque sala de bombas	2	A	2	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento
6	Válvula check	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
6	Válvula check	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
7	Enfriador	1	A	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	Mantenimiento
7	Enfriador	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	Mantenimiento
8	Válvula direccional 3/2	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
8	Válvula direccional 3/2	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento
8	Válvula direccional 3/2	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
8	Válvula direccional 3/2	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
9	Acumulador	1	A	1	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Reemplazo de válvula de carga	450h	Mantenimiento
9	Acumulador	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión bladder	450h	Mantenimiento
11	Flujómetro drenó	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento
11	Flujómetro drenó	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento
13	Flujómetro retorno 2	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento

Tabla E.2: Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 2).

13	Flujómetro retorno 2	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento
14	Flujómetro retorno 5	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento	
14	Flujómetro retorno 5	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento	
21	Conjunto válvulas check	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
21	Conjunto válvulas check	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento	
22	Válvula de carga hidrostática	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento	
22	Válvula de carga hidrostática	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento	
22	Válvula de carga hidrostática	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento	
22	Válvula de carga hidrostática	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento	
23	Flujómetro hidrostática	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento	
23	Flujómetro hidrostática	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento	
24	Válvula check circuito abierto 1	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
24	Válvula check circuito abierto 1	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento	
25	Válvula check circuito abierto 2	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
25	Válvula check circuito abierto 2	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento	
26	Filtros circuito abierto	1	A	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento	
27	Flujómetros circuito abierto	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento	
27	Flujómetros circuito abierto	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento	
28	Válvulas de carga circuito abierto	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento	
28	Válvulas de carga circuito abierto	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento	
28	Válvulas de carga circuito abierto	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento	

Tabla E.3: Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 3).

28	Válvulas de carga circuito abierto	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
29	Filtros circuito abierto	1	A	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento
30	Estanque principal banco de pruebas	1	A	1	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
30	Estanque principal banco de pruebas	1	A	2	S	S	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
30	Estanque principal banco de pruebas	2	A	1	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de respiradero	450h	Mantenimiento
30	Estanque principal banco de pruebas	2	A	2	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento
31	Manifold de piso	1	A	2	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
31	Manifold de piso	1	B	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento

Tabla E.4: Hoja de decisión RCM para sistema 1 (parte 4).

REF. INFO.			EVAL. CONSECUENCIAS				H1/	H2/	H3/	ACCION A FALTA DE			TAREA PROPUESTA	DETALLE TAREA	INTERVALO INICIAL	RESPONSABLE		
Id.	Componente	F	FF	FM	H	S	E	O	O1/	O2/	O3/	H4					H5	S4
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	A	1	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de pistones y revisión de código ISO del aceite	450h	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	A	4	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	A	6	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	B	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	B	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión válvula de alivio y reajustar	450h	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	1	B	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de servo pistón, e inspección diaria del código ISO del aceite	450h	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	2	A	2	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar manómetro y ruidos excesivos	En operación	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	2	A	3	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	2	A	4	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
33	Electroválvula direccional 4/3	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
33	Electroválvula direccional 4/3	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento
33	Electroválvula direccional 4/3	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
33	Electroválvula direccional 4/3	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
34	Válvula liberadora de presión	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
34	Válvula liberadora de presión	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento

Tabla E.5: Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 1).

34	Válvula liberadora de presión	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento
34	Válvula liberadora de presión	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
35	Flujómetro	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento
35	Flujómetro	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento
36	Válvula selectoras (OR)	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	Mantenimiento
36	Válvula selectoras (OR)	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
36	Válvula selectoras (OR)	1	A	3	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
37	Flujómetro	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento
37	Flujómetro	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento
39	Flujómetro	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento
39	Flujómetro	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools y monitoreo de código ISO de aceite	450h	Mantenimiento
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	Mantenimiento

Tabla E.6: Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 2).

42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	1	B	2	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado	-	Mantenimiento	
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	1	B	3	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado	-	Mantenimiento	
43	Motor eléctrico	1	A	1	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado	-	Mantenimiento	
43	Motor eléctrico	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
43	Motor eléctrico	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	Mantenimiento
43	Motor eléctrico	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	Mantenimiento
43	Motor eléctrico	1	B	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de rodamientos	450h	Mantenimiento
44	Bomba de engranajes	1	A	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión de correcta instalación de flexibles	Diario	Mantenimiento
44	Bomba de engranajes	1	A	2	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	Mantenimiento
44	Bomba de engranajes	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Inspección de estado del machón de acople	450h	Mantenimiento
44	Bomba de engranajes	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Inspección de placas de empuje	450h	Mantenimiento
44	Bomba de engranajes	1	C	1	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
44	Bomba de engranajes	1	C	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
45	Válvula selectora (OR) PIT	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	Mantenimiento
45	Válvula selectora (OR) PIT	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
45	Válvula selectora (OR) PIT	1	A	3	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
46	Válvula direccional 3/2	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
46	Válvula direccional 3/2	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento

Tabla E.7: Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 3).

46	Válvula direccional 3/2	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
46	Válvula direccional 3/2	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
49	Regulador de caudal bomba 1	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
49	Regulador de caudal bomba 1	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión perno de ajuste	450h	Mantenimiento
50	Regulador LS Auger y Spinner	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
50	Regulador LS Auger y Spinner	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
50	Regulador LS Auger y Spinner	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento
50	Regulador LS Auger y Spinner	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
51	Regulador LS bomba 1	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
51	Regulador LS bomba 1	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
51	Regulador LS bomba 1	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento
51	Regulador LS bomba 1	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento

Tabla E.8: Hoja de decisión RCM para sistema 2 (parte 4).

REF. INFO.				EVAL. CONSECUENCIAS				H1/S1/O1/N1	H2/S2/O2/N2	H3/S3/O3/N3	ACCION A FALTA DE			TAREA PROPUESTA	DETALLE TAREA	INTERVALO INICIAL	RESPONSABLE	
Id.	Componente	F	FF	FM	H	S	E	O	H4	H5	S4							
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	A	1	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de pistones y revisión de código ISO del aceite	450h	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	A	4	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	A	6	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	B	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	B	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión válvula de alivio y reajustar	450h	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	1	B	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de servo pistón, e inspección diaria del código ISO del aceite	450h	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	2	A	2	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar manómetro y ruidos excesivos	En operación	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	2	A	3	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	2	A	4	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
54	Válvula liberadora de presión	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
54	Válvula liberadora de presión	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento

Tabla E.9: Hoja de decisión RCM para sistema 3 (parte 1).

54	Válvula liberadora de presión	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento
54	Válvula liberadora de presión	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
56	Comando PVG32	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
56	Comando PVG32	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento
56	Comando PVG32	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
56	Comando PVG32	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
57	Reguladora de caudal bomba 2	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
57	Reguladora de caudal bomba 2	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión perno de ajuste	450h	Mantenimiento
58	Reguladora de LS bomba 2	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
58	Reguladora de LS bomba 2	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
58	Reguladora de LS bomba 2	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	Mantenimiento
58	Reguladora de LS bomba 2	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	Mantenimiento
59	Flujómetro bomba circuito 2	1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	Mantenimiento
59	Flujómetro bomba circuito 2	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	Mantenimiento
60	Electroválvula direccional 4/3	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
60	Electroválvula direccional 4/3	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento

Tabla E.10: Hoja de decisión RCM para sistema 3 (parte 2).

60	Electroválvula direccional 4/3	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
60	Electroválvula direccional 4/3	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
61	Válvula selectoras (OR)	1	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	Mantenimiento
61	Válvula selectoras (OR)	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
61	Válvula selectoras (OR)	1	A	3	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento

Tabla E.11: Hoja de decisión RCM para sistema 3 (parte 3).

REF. INFO.				EVAL. CONSECUENCIAS				H1/	H2/	H3/	ACCION A FALTA DE			TAREA PROPUESTA	DETALLE TAREA	INTERVAL O INICIAL	RESPONSABL E	
Id.	Componente	F	FF	FM	H	S	E	O	O1/	O2/	O3/	H4	H5					S4
62	Motor eléctrico	1	A	1	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado	-	Mantenimiento	
62	Motor eléctrico	1	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
62	Motor eléctrico	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	Mantenimiento
62	Motor eléctrico	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	Mantenimiento
62	Motor eléctrico	1	B	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de rodamientos	450h	Mantenimiento
63	Bomba de engranajes	1	A	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Revisión de correcta instalación de flexibles	Diario	Mantenimiento
63	Bomba de engranajes	1	A	2	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	Mantenimiento
63	Bomba de engranajes	1	A	3	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Inspección de estado del machón de acople	450h	Mantenimiento
63	Bomba de engranajes	1	A	4	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Inspección de placas de empuje	450h	Mantenimiento
63	Bomba de engranajes	1	C	1	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	Mantenimiento
63	Bomba de engranajes	1	C	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
65	Enfriador	1	A	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	Mantenimiento
65	Enfriador	1	A	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	Mantenimiento
66	Válvula 3/2	1	A	2	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento
66	Válvula 3/2	1	B	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	Mantenimiento
66	Válvula 3/2	2	A	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	Mantenimiento
66	Válvula 3/2	2	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	Mantenimiento

Tabla E.12: Hoja de decisión RCM para sistema 4 (parte 1).

67	Estanque de fugas	1	A	1	S	N	S	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	Mantenimiento
67	Estanque de fugas	1	A	2	S	S	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de sellos	450h	Mantenimiento
67	Estanque de fugas	2	A	1	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de respiradero	450h	Mantenimiento
67	Estanque de fugas	2	A	2	N	-	-	-	N	S	-	-	-	-	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento
69	Filtro de retorno	1	A	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	Mantenimiento

Tabla E.13: Hoja de decisión RCM para sistema 4 (parte 2).

REF. INFO.				EVAL. CONSECUENCIAS				H1/	H2/	H3/	ACCION A FALTA DE			TAREA PROPUESTA	DETALLE TAREA	INTERVAL O INICIAL	RESPONSABLE	
Id.	Componente	F	FF	FM	H	S	E	O	O1/ N1	O2/ N2	O3/ N3	H4	H5	S4				
70	Datalogger	1	A	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Tarea búsqueda de fallos	Revisión componentes internos flujómetro	450h	Mantenimiento
70	Datalogger	1	A	5	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado		-	Mantenimiento
71	Manifold de alimentación	1	A	2	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
71	Manifold de alimentación	1	B	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
72	Flexibles	1	A	1	S	S	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	Mantenimiento
72	Flexibles	1	B	1	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
72	Flexibles	1	B	2	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	Mantenimiento
72	Flexibles	1	B	4	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	Mantenimiento
72	Flexibles	2	A	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha y revisión de temperatura de aceite del sistema	Diario	Mantenimiento
72	Flexibles	1	A	3	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	Mantenimiento
73	Cañerías	1	A	1	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha y revisión de temperatura de aceite del sistema	450h	Mantenimiento

Tabla E.14: Hoja de decisión RCM para sistema 5.

Anexo F

Costos asociados al plan de mantenimiento

A continuación se presenta el detalle de los costos asociados al plan piloto de mantenimiento.

F.1. Costos correctivos

Ver tabla F.1.

F.2. Costos preventivos

Ver tablas F.2, F.3, F.4, F.5, F.6, F.7, F.8, F.9, F.10 y F.11.

ID.	COMPONENTE	TAREA PROPUESTA	Tiempo reparación [h]	Costo HH reparación [\$/h]	Costo repuesto correctivo [\$/h]	Cantidad de equipos	Tiempo de ineficiencia [h]	Costo de ineficiencia promedio [\$/h]	Total [\$/h]
2	Bomba de pistones axiales S90	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 350.000	1	6,1	\$ 1.147.826	\$ 7.385.339
3	Motor de pistones axiales	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ -	1	0,66	\$ 1.147.826	\$ 758.525
3	Motor de pistones axiales	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 200.000	1	6,1	\$ 1.147.826	\$ 7.235.339
6	Válvula check	Ningún mantenimiento programado	4	\$ 6.000	\$ 69.834	1	2,5	\$ 1.147.826	\$ 2.951.399
21	Conjunto válvulas check	Ningún mantenimiento programado	4	\$ 6.000	\$ 69.834	1	2,5	\$ 1.147.826	\$ 2.951.399
24	Válvula check circuito abierto 1	Ningún mantenimiento programado	4	\$ 6.000	\$ 69.834	1	2,5	\$ 1.147.826	\$ 2.951.399
25	Válvula check circuito abierto 2	Ningún mantenimiento programado	4	\$ 6.000	\$ 69.834	1	2,5	\$ 1.147.826	\$ 2.951.399
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 250.000	1	2,1	\$ 1.147.826	\$ 2.670.035
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 150.000	1	0,8	\$ 1.147.826	\$ 1.073.061
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 150.000	1	0,8	\$ 1.147.826	\$ 1.073.061
43	Motor eléctrico	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 5.000	1	0,66	\$ 1.147.826	\$ 763.525
49	Regulador de caudal bomba 1	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 80.000	1	2,1	\$ 1.147.826	\$ 2.500.035
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 250.000	1	2,1	\$ 1.147.826	\$ 2.670.035
57	Reguladora de caudal bomba 2	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 80.000	1	2,1	\$ 1.147.826	\$ 2.500.035
62	Motor eléctrico	Ningún mantenimiento programado	16	\$ 6.000	\$ 5.000	1	0,66	\$ 1.147.826	\$ 763.525
70	Datalogger	Ningún mantenimiento programado	1	\$ 6.000	\$ 150.000	1	1,5	\$ 1.147.826	\$ 1.877.739

Tabla F.1: Costos correctivos para el plan piloto de mantenimiento.

ID.	COMPONENTE	TAREA PROPUESTA	DETALLE TAREA	INTERVALO INICIAL	Cantidad Frec. Anual	Cantidad de equipos	Tiempo reparación [h]	Costo HH reparación [\$/h]	Costo repuesto preventivo [\$/h]	Cant. Insumos	Insumos [\$/h]	Total [\$/h]
1	Motor diesel	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de elemento filtro	450 h	2	1	16	\$ -	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 40.162
1	Motor diesel	Tarea a condición	Inspección visual del nivel de combustible antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
1	Motor diesel	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	16	\$ -	\$ 60.000	1	\$ 4.758	\$ 129.516
1	Motor diesel	Tarea a condición	Inspección visual del nivel de combustible antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de pistones y revisión de código ISO del aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	0,333333	1	16	\$ 6.000	\$ 800.000	3	\$ 4.758	\$ 287.425
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ 150.000	1	\$ 4.758	\$ 347.916
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea búsqueda de fallos	Revisión válvula de alivio y reajustar	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 67.116
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de servo pistón, e inspección diaria del código ISO del aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 67.116
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea a condición	Verificar manómetro y ruidos excesivos	En operación	250	1	16	\$ 4.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 90.000
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
2	Bomba de pistones axiales S90	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
3	Motor de pistones axiales	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	0,333333	1	16	\$ 6.000	\$ 800.000	1	\$ 4.758	\$ 284.253
3	Motor de pistones axiales	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
3	Motor de pistones axiales	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
3	Motor de pistones axiales	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
3	Motor de pistones axiales	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	6 meses	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 50.000	\$ 196.000
4	Filtro	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 64.162
5	Estanque sala de bombas	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 112.000

Tabla F.2: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 1)

5	Estanque sala de bombas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de sellos	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 100.000	1	\$ 4.758	\$ 233.516
5	Estanque sala de bombas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de respiradero	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 50.000	1	\$ 4.758	\$ 133.516
5	Estanque sala de bombas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de filtro	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 64.162
6	Válvula check	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
7	Enfriador	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
7	Enfriador	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
8	Válvula direccional 3/2	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
8	Válvula direccional 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
8	Válvula direccional 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 42.948
8	Válvula direccional 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
9	Acumulador	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Reemplazo de válvula de carga	450h	2	1	24	\$ 6.000	\$ 150.000	3	\$ 4.758	\$ 443.748
9	Acumulador	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión bladder	450h	2	1	24	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 143.748
11	Flujómetro drenó	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
11	Flujómetro drenó	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
13	Flujómetro retorno 2	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
13	Flujómetro retorno 2	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
14	Flujómetro retorno 5	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
14	Flujómetro retorno 5	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
21	Conjunto válvulas check	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	4	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 133.728
22	Válvula de carga hidrostática	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
22	Válvula de carga hidrostática	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 19.116

Tabla F.3: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 2)

22	Válvula de carga hidrostática	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 43.032
22	Válvula de carga hidrostática	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
23	Flujómetro hidrostática	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
23	Flujómetro hidrostática	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
24	Válvula check circuito abierto 1	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	2	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 66.864
25	Válvula check circuito abierto 2	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	2	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 66.864
26	Filtros circuito abierto	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	2	2	2	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 128.324
27	Flujómetros circuito abierto	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	2	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 22.500
27	Flujómetros circuito abierto	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	2	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 4.021.516
28	Válvulas de carga circuito abierto	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	2	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 81.096
28	Válvulas de carga circuito abierto	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	2	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 38.232
28	Válvulas de carga circuito abierto	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	2	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 86.064
28	Válvulas de carga circuito abierto	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	2	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 81.096
29	Filtros circuito abierto	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 64.162
30	Estanque principal banco de pruebas	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
30	Estanque principal banco de pruebas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de sellos	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ 200.000	1	\$ 4.758	\$ 457.516
30	Estanque principal banco de pruebas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de respiradero	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ 80.000	1	\$ 4.758	\$ 217.516
30	Estanque principal banco de pruebas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de filtro	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 64.162
31	Manifold de piso	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	24	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000
31	Manifold de piso	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	24	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000

Tabla F.4: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 3)

32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de pistones y revisión de código ISO del aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	0,333333	1	16	\$ 6.000	\$ 800.000	1	\$ 4.758	\$ 284.253
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ 250.000	1	\$ 4.758	\$ 567.116
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea búsqueda de fallos	Revisión válvula de alivio y reajustar	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 57.432
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de servo pistón, e inspección diaria del código ISO del aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 67.116
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea a condición	Verificar manómetro y ruidos excesivos	En operación	2	1	16	\$ 4.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 720
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
32	Bomba de pistones axiales S45 Frame E	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
33	Electroválvula direccional 4/3	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
33	Electroválvula direccional 4/3	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
33	Electroválvula direccional 4/3	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 42.948
33	Electroválvula direccional 4/3	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
34	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
34	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 19.116
34	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
34	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
35	Flujómetro	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
35	Flujómetro	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
36	Válvula selectoras (OR)	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916

Tabla F.5: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 4)

36	Válvula selectoras (OR)	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
36	Válvula selectoras (OR)	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ 30.000	1	\$ 4.758	\$ 107.916
37	Flujómetro	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
37	Flujómetro	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
39	Flujómetro	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
39	Flujómetro	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 47.748
41	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools y monitoreo de código ISO de aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
42	Válvula de control de flujo AUGER-SPINNER	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
43	Motor eléctrico	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
43	Motor eléctrico	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
43	Motor eléctrico	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
43	Motor eléctrico	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de rodamientos	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ 45.000	1	\$ 4.758	\$ 214.716
44	Bomba de engranajes	Tarea a condición	Revisión de correcta instalación de flexibles	Diario	250	1	8	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000
44	Bomba de engranajes	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	0,333333	1	8	\$ 6.000	\$ 100.000	3	\$ 4.758	\$ 47.691
44	Bomba de engranajes	Tarea de búsqueda de fallos	Inspección de estado del machón de acople	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 14.316
44	Bomba de engranajes	Tarea de búsqueda de fallos	Inspección de placas de empuje	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 47.832
44	Bomba de engranajes	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232

Tabla F.6: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 5)

44	Bomba de engranajes	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 148.000
45	Válvula selectora (OR) PIT	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
45	Válvula selectora (OR) PIT	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
45	Válvula selectora (OR) PIT	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ 30.000	1	\$ 4.758	\$ 107.916
46	Válvula direccional 3/2	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
46	Válvula direccional 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
46	Válvula direccional 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 42.948
46	Válvula direccional 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
49	Regulador de caudal bomba 4	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión perno de ajuste	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
50	Regulador LS Auger y Spinner	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
50	Regulador LS Auger y Spinner	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 19.116
50	Regulador LS Auger y Spinner	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
50	Regulador LS Auger y Spinner	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
51	Regulador LS bomba 1	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
51	Regulador LS bomba 1	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 19.116
51	Regulador LS bomba 1	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
51	Regulador LS bomba 1	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea a condición	Inspección visual de flexibles	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea búsqueda de fallos	Análisis dimensional de pistones y revisión de código ISO del aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716

Tabla F.7: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 6)

52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	3 años	0,333333	1	16	\$ 6.000	\$ 800.000	1	\$ 4.758	\$ 287.453
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ 250.000	1	\$ 4.758	\$ 567.116
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea búsqueda de fallos	Revisión válvula de alivio y reajustar	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 95.832
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea búsqueda de fallos	Revisión de servo pistón, e inspección diaria del código ISO del aceite	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 67.116
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea a condición	Verificar manómetro y ruidos excesivos	En operación	2	1	16	\$ 4.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 720
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
52	Bomba de pistones axiales S45 Frame J	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 47.748
53	Válvula distribuidora 4 posiciones	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 196.000
54	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
54	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 19.116
54	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
54	Válvula liberadora de presión	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
56	Comando PVG32	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 148.000
56	Comando PVG32	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
56	Comando PVG32	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 47.748

Tabla F.8: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 7)

56	Comando PVG32	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 148.000
57	Reguladora de caudal bomba 2	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión perno de ajuste	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
58	Reguladora de LS bomba 2	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
58	Reguladora de LS bomba 2	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros y prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 19.116
58	Reguladora de LS bomba 2	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión de asiento y poppet, además monitoreo de código de limpieza ISO	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
58	Reguladora de LS bomba 2	Tarea de búsqueda de fallos	Prueba de funcionamiento	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 40.548
59	Flujómetro bomba circuito 2	Tarea a condición	Revisión código ISO de aceite	Diario	250	1	6	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 33.750
59	Flujómetro bomba circuito 2	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Calibración según norma ISO 9001	Anual	1	1	1	\$ 6.000	\$ 2.000.000	1	\$ 4.758	\$ 2.010.758
60	Electroválvula direccional 4/3	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
60	Electroválvula direccional 4/3	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
60	Electroválvula direccional 4/3	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 42.948
60	Electroválvula direccional 4/3	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
61	Válvula selectoras (OR)	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión dimensional de asiento de válvula	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
61	Válvula selectoras (OR)	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 33.432
61	Válvula selectoras (OR)	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de sellos	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ 30.000	1	\$ 4.758	\$ 93.516
62	Motor eléctrico	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	16	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 30.000
62	Motor eléctrico	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
62	Motor eléctrico	Tarea de búsqueda de fallos	Medición de parámetros nominales del motor	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
62	Motor eléctrico	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de rodamientos	450h	2	1	16	\$ 6.000	\$ 45.000	1	\$ 4.758	\$ 214.716
63	Bomba de engranajes	Tarea a condición	Revisión de correcta instalación de flexibles	Diario	250	1	8	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000

Tabla F.9: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 8)

63	Bomba de engranajes	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	0,333333	1	8	\$ 6.000	\$ 100.000	3	\$ 4.758	\$ 50.891
63	Bomba de engranajes	Tarea de búsqueda de fallos	Inspección de estado del machón de acople	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 14.316
63	Bomba de engranajes	Tarea de búsqueda de fallos	Inspección de placas de empuje	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 57.348
63	Bomba de engranajes	Tarea a condición	Verificar fisuras con líquido penetrante	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 38.232
63	Bomba de engranajes	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 148.000
65	Enfriador	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
65	Enfriador	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Medición de parámetros nominales	450h	2	1	8	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 28.716
66	Válvula 3/2	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
66	Válvula 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis dimensional de spools, túneles de cuerpos. Inspección de cuerpos de trabajo	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 23.916
66	Válvula 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión y prueba de compensador de presión	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	3	\$ 4.758	\$ 42.948
66	Válvula 3/2	Tarea de búsqueda de fallos	Análisis de corrosión visual e instrumental a spools	450h	2	1	4	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 124.000
67	Estanque de fugas	Tarea a condición	Análisis de corrosión visual e instrumental	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 25.000	\$ 112.000
67	Estanque de fugas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de sellos	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 60.000	1	\$ 4.758	\$ 153.516
67	Estanque de fugas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de respiradero	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 80.000	1	\$ 4.758	\$ 193.516
67	Estanque de fugas	Tarea de reacondicionamiento cíclico	Cambio de filtro	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 64.162
69	Filtro de retorno	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de filtro	450h	2	1	2	\$ 6.000	\$ 15.323	1	\$ 4.758	\$ 64.162
70	Datalogger	Tarea de búsqueda de fallos	Revisión componentes internos flujómetro	450h	2	1	1	\$ 6.000	\$ -	2	\$ 4.758	\$ 20.232
71	Manifold de alimentación	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	5	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 28.125
71	Manifold de alimentación	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	5	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 28.125
72	Flexibles	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	0,333333	1	8	\$ 6.000	\$ 1.000.000	3	\$ 4.758	\$ 346.091
72	Flexibles	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	8	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000

Tabla F.10: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 9)

72	Flexibles	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	0,333333	1	8	\$ 6.000	\$ 1.000.000	3	\$ 4.758	\$ 346.091
72	Flexibles	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha	Diario	250	1	8	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000
72	Flexibles	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha y revisión de temperatura de aceite del sistema	Diario	250	1	8	\$ 1.500	\$ -	0	\$ 4.758	\$ 45.000
72	Flexibles	Tarea de sustitución cíclica	Cambio de flexibles	450h	0,333333	1	8	\$ 6.000	\$ 1.000.000	3	\$ 4.758	\$ 346.091
73	Cañerías	Tarea a condición	Inspección visual antes de la puesta en marcha y revisión de temperatura de aceite del sistema	450h	2	1	24	\$ 6.000	\$ -	1	\$ 4.758	\$ 18.156

Tabla F.11: Costos preventivos para el plan piloto de mantenimiento. (parte 10)

Anexo G

Propuestas de mejora para el banco de pruebas

A continuación se muestran algunas hojas para registrar datos relativos a la operación y mantenimiento del banco de pruebas.

G.1. Registro de información para el uso del banco de pruebas

Ver figura G.1.

G.2. Registro de información para intervenciones preventivas

Ver figura G.2.

G.3. Registro de información para intervenciones correctivas

Ver figura G.3.

Bitácora de prueba en banco

Componente:	OT:
Modelo:	Fecha:
N° serie:	Hora inicio:
Técnico:	Hora fin:

Código ISO inicial: ___/___/___	Horómetro inicio:
Código ISO final: ___/___/___	Horómetro fin:

Inspección visual antes de la puesta en marcha (marcar con una X donde corresponda):

Si	No	Detalle Inspección visual previa
		¿Nivel de combustible motor diesel dentro de parámetro?
		¿Nivel de aceite estanque principal y secundario sobre nivel mínimo?
		¿Existen fugas visibles en alguna cañería, flexible o conector?
		¿El machón de acople visualmente se ve en buen estado? (si corresponde)
		¿Faltan insumos para realizar la prueba?
		¿El componente a prueba fue reparado o revisado antes de entrar al banco?
		¿Los flexibles a utilizar visualmente presentan algún desgaste?

En caso de existir alguna respuesta Si, se recomienda no utilizar el banco de pruebas y comunicar a técnico senior.

Observaciones (ej: pérdida de aceite, temperatura, ruidos extraños):

Firma Técnico Operario

Firma Técnico Senior

Figura G.1: Hoja propuesta para obtener información con cada uso del banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.

Hoja de registro de intervención programada banco de pruebas

Sistema:	Fecha:
Componente:	Hora inicio reparación:
N° serie:	Hora fin de reparación:
OP:	Técnico mantenimiento:
Código ISO inicial:	Código ISO final:

Trabajos a realizar			
Limpieza general		Análisis de fisuras	
Cambio de aceite		Balanceo	
Cambio de sellos		Revisión de machón	
Cambio de filtros		Revisión de flexibles	
Cambio de rodamientos		Inspección de agujeros	
Desmontaje de equipo		Revisión de enfriador	
Reubicación equipo		Trabajo externo	
Revisión de bomba hidráulica		Reemplazo de componente	
Revisión de motor hidráulico		Flushing a cañerías	
Revisión de comando de válvulas		Díálisis de aceite	
Revisión de motor eléctrico		Reapriete según torques	

Observaciones:

Firma Técnico
Mantenimiento

Firma Técnico Senior

Figura G.2: Hoja propuesta para registrar las intervenciones programadas a cada componente del banco. Fuente: elaboración propia.

Hoja de registro de falla banco de pruebas

Sistema:	Fecha:
Componente:	Hora inicio falla:
N° serie:	Hora inicio reparación:
OP:	Hora fin de reparación:
Técnico en falla:	Técnico mantenimiento:

Repuestos e insumos utilizados en reparación:

Observaciones:

Firma Técnico
Mantenimiento

Firma Técnico Senior

Figura G.3: Hoja propuesta para registrar las fallas registradas en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.