



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

DEFINICIÓN DE PLAN DE MANTENIMIENTO ÓPTIMO PARA EQUIPOS CRÍTICOS DE UNA PLANTA DE LAMINACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

OCTAVIO NICOLÁS FIGUEROA FIGUEROA

PROFESOR GUÍA:
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO ORTÍZ BERNARDIN
ROBERTO CORVALÁN PAIVA

SANTAGO DE CHILE
2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero civil
mecánico.
POR: Octavio Nicolás Figueroa Figueroa
PROFESOR GUÍA: Viviana Meruane Naranjo

El objetivo del presente trabajo de título es la definición de un plan óptimo de mantenimiento para los equipos críticos de una planta de laminación de metales.

En la actualidad, las empresas están invirtiendo en la definiciones de planes de mantenimiento acotados a su realidad, lo que permite sacar el mayor provecho a sus equipos y, con ello, minimizar costos asociados a ceses de producción, costos en compra y almacenamiento de repuestos y costos en horas hombre de reparación, entre otros. Un buen plan de mantenimiento constituye un gran aporte a cualquier proceso productivo.

La primera etapa del plan es el análisis de falla y criticidad de los equipos. Una vez definidos los equipos o componentes críticos se puede proceder al estudio de costos asociados. Existe una gran cantidad de modelos para el estudio de los costos, la selección del más apropiado depende del caso en estudio. Por último, es necesario definir una estrategia de mantenimiento y una frecuencia óptima de inspecciones.

Luego de realizado el estudio, se definió un plan de mantenimiento preventivo para todos los equipos críticos analizados, con excepción del sistema de lubricación del Tren Medio. Sin embargo, no es posible generar un plan detallado debido a la falta de datos precisos para los componentes de cada equipo. Por esta razón, en primer lugar se generó un análisis de sensibilidad para esclarecer cuál es el horizonte de aplicación de los planes de mantenimiento definidos (según los costos utilizados). Además, se ha estudiado la frecuencia óptima de inspección para cada equipo. Cada inspección considerando que la detención del equipo no es necesaria. Es decir, inspecciones visuales, auditivas o en base a sensores que no impliquen un gran costo o la detención del equipo.

En definitiva, los resultados obtenidos para cada equipo son los siguientes:

- **Ventilador aire combustión:** Mantenimiento preventivo cada 15 días / 6 inspecciones preventivas mensuales.
- **Sistema Kick-Off:** Mantenimiento preventivo cada 68 días / 4 inspecciones preventivas mensuales.
- **Lubricación Tren de Desbaste:** Mantenimiento preventivo cada 85 días / 4 inspecciones preventivas mensuales.
- **Lubricación Tren Medio:** Mantenimiento correctivo / 6 inspecciones preventivas mensuales.
- **Motor del Monoblock:** Mantenimiento preventivo cada 29 días / 11 inspecciones preventivas mensuales.
- **Sistema Neumático:** Mantenimiento preventivo cada 106 días / Inspección preventiva mensual.

Por otra parte, se estima que existirá un 25% de ahorro en el costo total de mantenimiento para el total de equipos críticos estudiados en el presente documento.

DEDICATORIA

A quienes me apoyaron en este largo y lindo proceso: Mi familia y amigos

AGRADECIMIENTOS

Resulta tremendamente complejo terminar este apartado sin dejar afuera a cada una de las personas que entregaron su “granito de arena” en este proceso. Haré lo mejor posible para lograrlo.

Entonces, agradezco en primer lugar a mis padres y hermanos: Alex, Mirtha, Alex (Jr.) y Valentina. A mis padres por entregarme los principios, valores y directrices para llegar hasta este momento. Por su incondicional apoyo, por su cariño infinito, las palmadas en la espalda para seguir adelante, las sonrisas, los llantos, los retos, los abrazos, los consejos, gracias por la vida. A mi hermano Alex por moldear mi carácter, por los juegos, las risas y peleas. A mi hermanita Valentina por llenar nuestra vida de alegría y por siempre entregar una sonrisa y ternura en los momentos de aflicción.

Cómo dejar de lado a los amigos. Siempre acostumbro a decir: “No tendré plata, pero estoy lleno de amigos”. Sin ellos claramente no podría haber logrado sacar esto adelante. En este momento agradezco en particular a los amigos de la U por haber estado más presentes en el proceso. Sobre todo a los amigos que están desde el primer momento, desde Bachi: Valbort y Javier. Son incontables las batallas, las conversas y carretes. Gracias, amigos por cada momento, por aguantarme en mis peores estados (de hambre y sueño) y por compartir su vida conmigo.

Quiero hacer un apartado especial para agradecer a Francisca, el amor de mi vida. Si bien no estuvo a lo largo de todo el proceso, representa la motivación para terminar esta carrera de la mejor manera. Gracias, amor, por tu entrega constante, por tu amor incondicional, por tu sonrisa eterna. Infinitamente agradecido por tu apoyo, por ser mi escape y cable a tierra, gracias por cambiar mi vida y completarme como lo haces.

En otro aspecto no puedo dejar de lado a esta tremenda universidad y cada una de las personas que la constituyen. Gracias por el tipo de profesional que generan, por los porrazos y por enseñar a levantarse de cada uno de ellos a punta de esfuerzo. Gracias a cada uno de mis profesores. En particular a los miembros de la comisión por guiarme en este trabajo. En especial, a la profesora Vivana Meruane por su tiempo, su conocimiento y su enorme sentido de la responsabilidad.

Además quisiera agradecer a José Escalona y José Díaz por proporcionarme la información relevante para generar esta memoria, por aconsejarme y acompañarme en el proceso.

En fin, es tremendamente complejo abarcar a toda esa gente importante en una página. Quiero hacer extensible estos agradecimientos a mi familia completa. Es decir, mis abuelas que partieron tempranamente, mi abuelo Mario, mis tíos y tías, mis primos y primas que siempre tuvieron fe en mí y me apoyaron con sus gestos y palabras. Gracias a los amigos del colegio, los amigos de la vida y a los amigos en la música que me han moldeado como persona y me han enseñado a ser mejor. Gracias a Don Sampa por darnos tantas alegrías con la Universidad de Chile (“El bullita”), aunque casi reprobé un ramo por hacernos campeón de la Sudamericana.

En resumen, gracias a todos quienes han estado a mi lado en mayor o menor medida por permitirme lograr este objetivo tan importante en mi vida. Ha sido un largo camino. En él he derramado sangre, sudor y lágrimas, pero esas lágrimas nunca fueron de tristeza o desesperanza, sino de alegría y satisfacción. Ahora a seguir adelante y como me dijo un gran amigo:

“Nunca hay descanso para quien busca la perfección”

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES.....	2
2.1 Estrategias de mantenimiento.....	2
2.2 Análisis de criticidad.....	3
2.2.1 Árbol de Falla.....	3
2.2.2 FMECA	4
2.3 Confiabilidad.....	5
2.3.1 Conceptos básicos	5
2.3.2 Modelo de Weibull.....	6
2.4 Estructura de costos.....	7
2.5 Selección de estrategias de mantenimiento	8
2.6 Frecuencia óptima de inspecciones	9
2.7 Sobre planta de laminación	10
3 DESARROLLO	11
3.1 Reconocimiento del problema y conocimiento de la planta (Etapa I).....	11
3.2 Análisis de fallas y criticidad (Etapa II).....	13
3.2.1 Árboles de falla	14
3.2.2 Matriz de criticidad	14
3.2.3 FMECA	19
3.3 Definición plan de mantenimiento (Etapa III)	19
3.3.1 Estimación parámetros de Weibull.....	19
3.3.2 Selección de estrategia de mantenimiento.....	20
3.3.3 Frecuencia de inspecciones	21
4 RESULTADOS.....	22
4.1 Árboles de Falla	22
4.1.1 Zona Horno Pre calentamiento.....	22
4.1.2 Zona tren de desgaste y tren medio	22
4.1.3 Zona Lubricación laminación.....	22
4.1.4 Zona Block terminación	23
4.1.5 Zona Barras	23
4.1.6 Zona Rollos	23
4.2 Matriz de Criticidad y selección equipos críticos	59
4.2.1 Zona Horno	59
4.2.2 Zona Tren de Desgaste	62
4.2.3 Zona Tren Medio.....	65

4.2.4 Zona Monoblock	70
4.2.5 Zona Frenacola	72
4.2.6 Resumen resultados.....	73
4.3 FMECA	76
4.3.1 Ventilador de aire combustión	76
4.3.2 Sistema Kick-Off.....	78
4.3.3 Sistema lubricación Tren de desbaste y Tren medio	79
4.3.4 Motor del Monoblock.....	81
4.3.5 Sistema neumático de frenacola.....	82
4.4 Estimación de parámetros de Weibull.....	83
4.4.1 Ventilador de aire combustión	83
4.4.2 Sistema Kick-Off.....	85
4.4.3 Lubricación Tren de Desbaste.....	87
4.4.4 Lubricación Tren Medio.....	89
4.4.5 Motor del Monoblock.....	91
4.4.6 Sistema neumático del Frenacola.....	93
4.5 Selección de estrategia de mantenimiento.....	95
4.5.1 Ventilador de aire combustión	95
4.5.2 Sistema Kick-Off.....	96
4.5.3 Lubricación Tren de Desbaste.....	97
4.5.4 Lubricación Tren Medio.....	98
4.5.5 Motor del Monoblock.....	99
4.5.6 Sistema neumático del Frenacola.....	100
4.6 Frecuencia de inspecciones	101
4.6.1 Ventilador de aire combustión	101
4.6.2 Sistema Kick-Off.....	101
4.6.3 Lubricación Tren de Desbaste.....	102
4.6.4 Lubricación Tren Medio.....	102
4.6.5 Motor Monoblock	103
4.6.6 Sistema Neumático del Frenacola	103
5 ANÁLISIS.....	104
5.1 Análisis de criticidad y definición de equipos críticos.....	104
5.2 FMECA	105
5.3 Estimación de parámetros de Weibull.....	106
5.4 Selección de estrategia de mantenimiento.....	107
5.5 Análisis de sensibilidad de costos de mantenimiento	108
5.5.1 Ventilador de aire combustión	108
5.5.2 Sistema Kick-Off.....	110

5.5.3 Lubricación Tren de Desbaste	112
5.5.4 Lubricación Tren Medio.....	114
5.5.5 Motor del Monoblock.....	116
5.5.6 Sistema Neumático del Frenacola	118
5.6 Ahorro en costos de mantenimiento	120
5.7 Frecuencia de inspecciones	121
6 CONCLUSIONES	122
7 BIBLIOGRAFÍA.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de símbolos utilizados en la construcción de árboles de falla	4
Tabla 2: Puntaje asignado para frecuencia	15
Tabla 3: Criterio utilizado para asignar los puntajes de costos	16
Tabla 4: Criterio utilizado para asignar puntajes de impacto ambiental, seguridad e higiene	16
Tabla 5: Criterio utilizado para asignar puntajes de impacto operacional	17
Tabla 6: Criterio utilizado para asignar el puntaje según la flexibilidad operacional	17
Tabla 7: Escala utilizada para definir criticidad según el modelo	18
Tabla 8: Criticidad para los equipos de la zona Horno según Modelo 1	59
Tabla 9: Criticidad para equipos zona Horno según Modelo 2	60
Tabla 10: Comparación entre equipos críticos según Modelo 1 y Modelo 2	61
Tabla 11: Equipos críticos en la zona Tren de Desbaste según Modelo 1	62
Tabla 12: Equipos críticos de zona Tren de Desbaste según Modelo 2	63
Tabla 13: Comparación entre equipos críticos según Modelo 1 y Modelo 2	64
Tabla 14: Equipos críticos de zona de Tren Medio según Modelo 1	65
Tabla 15: Equipos críticos en zona de Tren Medio según Modelo 2	67
Tabla 16: Comparación entre equipos críticos según Modelo 1 y Modelo 2	69
Tabla 17: Equipos críticos para zona Monoblock según Modelo 1	70
Tabla 18: Equipos críticos en zona Monoblock según Modelo 2	71
Tabla 19: Comparación entre equipos críticos según Modelos 1 y Modelo 2	71
Tabla 20: Equipos críticos de zona Frenacola según Modelo 1	72
Tabla 21: Equipos críticos en zona Frenacola según Modelo 2	72
Tabla 22: Comparación Equipos críticos en Zona Frenacola según Modelo 1 y Modelo 2	73
Tabla 23: Resumen equipos críticos por zona según Modelo 2 (Propuesta de equipos críticos)	74
Tabla 24: FMECA para primer subsistema (Motor) analizado en ventilador de aire/combustión	76
Tabla 25: FMECA para segundo y tercer subsistema (Sistema de ventilación y Suministro, respectivamente) analizados para ventilador aire/combustión	77
Tabla 26: FMECA para sistema Kick-Off	78
Tabla 27: FMECA para los primeros dos subsistemas analizados (Bombas y Motor de bombas, respectivamente) para sistema de lubricación de tren de desbaste y tren medio	79
Tabla 28: FMECA para tercer y cuarto subsistema analizado (Sist. De intercambio térmico y Estructura y condición del lubricante) para sistema de lubricación del Tren de desbaste y Tren medio	80
Tabla 29: FMECA para Motor del Monoblock	81
Tabla 30: FMECA para Sistema Neumático del Frenacola	82
Tabla 31: Parámetros de Weibull para Ventilador aire combustión	83
Tabla 32: Validación Test Kolmogorov-Smirnov para ventilador aire combustión	84
Tabla 33: Parámetros de Weibull para sistema Kick-Off	85
Tabla 34: Test de validación Kolmogorov-Smirnov para sistema Kick-Off	86
Tabla 35: Parámetros de Weibull para lubricación tren de desbaste	87
Tabla 36: Test de validación Kolmogorov-Smirnov	88
Tabla 37: Parámetros de Weibull para lubricación del Tren Medio	89
Tabla 38: Test de validación Kolmogorov-Smirnov	90
Tabla 39: Parámetros de Weibull para Motor del Monoblock	91
Tabla 40: Test de validación Kolmogorov-Smirnov	92
Tabla 41: Parámetros de Weibull para el Sistema neumático del Frenacola	93
Tabla 42: Test de validación Kolmogorov-Smirnov	94
Tabla 43: Costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para ventilador de aire combustión	95
Tabla 44: Costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para sistema Kick-Off	96

Tabla 45: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Lubricación Tren de Desbaste	97
Tabla 46: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Lubricación Tren Medio	98
Tabla 47: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Motor del Monoblock	99
Tabla 48: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Sistema neumático del Frenacola.....	100
Tabla 49: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para ventilador aire combustión.....	101
Tabla 50: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para Sistema Kick-Off	101
Tabla 51: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para Lubricación Tren de Desbaste.....	102
Tabla 52: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para Lubricación Tren Medio	102
Tabla 53: Parámetros de cálculo y frecuencia mensual para Motor del Monoblock	103
Tabla 54: Parámetros de cálculo y frecuencia mensual para Sistema Neumático del Frenacola	103
Tabla 55: Mínimos obtenidos para la variación de costos de mantenimiento correctivo y preventivo para el Ventilador de aire combustión	109
Tabla 56: Mínimos obtenidos para las variaciones en costos de mantenimiento correctivo y preventivo para el Sistema Kick-Off.....	111
Tabla 57: Mínimos obtenidos para variación de costos de mantenimiento correctivo y preventivo para Lubricación Tren de Desbaste.....	113
Tabla 58: Mínimos obtenidos al variar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para la Lubricación del Tren Medio.....	115
Tabla 59: Mínimos obtenidos al variar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para Motor del Monoblock	117
Tabla 60: Mínimos obtenidos al variar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para Sistema Neumático del Frenacola.....	119
Tabla 61: Balance de costos actuales (Sin plan optimizado) y ahorro luego de aplicar el plan para cada equipo.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema estrategias de mantenimiento	2
Figura 2: Imagen representativa de un árbol de fallas.....	3
Figura 3: Flujo representativo de la estructura de la información en la construcción de un FMECA	5
Figura 4: Esquema representativo de los tiempos implícitos en la vida de un componente	5
Figura 5: Costo global (Curva roja), costo de falla (Curva azul) y costo de intervención (Curva verde).....	7
Figura 6: Flujo de decisión para selección de estrategia de mantenimiento	8
Figura 7: Esquema del proceso de laminación (Fuente: Elaboración propia).....	10
Figura 8: Matriz de criticidad definida para el modelo 1 y el criterio utilizado.....	18
Figura 9: Árbol de falla para función “Palanquilla es depositada en sistema guía de entrada del horno” en zona Horno.....	24
Figura 10: Árbol de falla para función “Transporte de palanquilla hasta entrada del horno” en zona Horno.....	25
Figura 11: Árbol de falla para función “Transporte de palanquilla al interior del horno” en zona Horno.....	26
Figura 12: Árbol de falla para función “Combustión” en zona Horno.....	27
Figura 13: Árbol de falla para función “Entrega óptima de fluido oleo hidráulico a los distintos actuadores” en zona Horno	28
Figura 14: Árbol de falla para función “Ingreso de palanquilla al tren de desbaste” en zona Desbaste y Tren medio	29
Figura 15: Árbol de falla para función “Desbaste de palanquilla” en equipos de desbaste horizontales D1, D3 y D5 en zona Desbaste y Tren medio.....	30
Figura 16: Árbol de falla para función “Desbaste de palanquilla” en equipos de desbaste verticales D2, D4 y D6 en zona Desbaste y Tren medio.....	31
Figura 17: Árbol de falla para función “Laminación de palanquilla en tren intermedio” en equipos de desbaste horizontales M7, M9, M11 y M13 en zona Desbaste y Tren medio	32
Figura 18: Árbol de falla para función “Laminación de palanquilla en tren medio” en equipos de desbaste verticales M8, M10, M12 y M14 en zona Desbaste y tren Medio	33
Figura 19: Árbol de falla para función “Formación de bucle o lazo” en zona Desbaste y Tren medio	34
Figura 20: Árbol de falla para función “Corte de punta y cola de palanquilla” en zona Desbaste y Tren medio.....	35
Figura 21: Árbol de falla para función “Cambio de cajas” en zona Desbaste y Tren medio	36
Figura 22: Árbol de falla para función “Lubricación reductores de estaciones de desbaste D1, D2 y D3” en zona Lubricación laminación	37
Figura 23: Árbol de falla para función “Lubricación reductores de estación de desbaste D4, D5, D6, M7 y M8” en zona Lubricación.....	38
Figura 24: Árbol de falla para función “Refrigeración estaciones M13 y M14 de laminación en zona Lubricación	39
Figura 25: Árbol de falla para función “Distribución óptima de fluido oleo hidráulico a los actuadores” en zona Lubricación.....	40
Figura 26: Árbol de falla para función “Distribución óptima de lubricación aire-aceite” en zona Lubricación	41
Figura 27: Árbol de falla para función “Corte de punta y cola de producto entrante al monoblock (Cizalla 2)” en zona Monoblock.....	42
Figura 28: Árbol de falla para función “Terminación en producto laminado” en zona Monoblock.....	43
Figura 29: Árbol de falla para función “Lubricación de reductor de monoblock” en zona Monoblock.....	44
Figura 30: Árbol de falla para función “Corte de punta y cola post monoblock” en zona Barras	45
Figura 31: Árbol de falla para función “Depositar barras en mesa de enfriamiento” en zona Barras.....	46
Figura 32: Árbol de falla para función “Transporte de manto” en zona Barras.....	47
Figura 33: Árbol de falla para función “Corte a la medida del manto” en zona Barras.....	48
Figura 34: Árbol de falla para función “Transporte de manto” en zona Barras.....	49

Figura 35: Árbol de falla para función “Empaque de fajos”	50
Figura 36: Árbol de falla para función “Entrega y pesaje de fajos” en zona Barras	51
Figura 37: Árbol de falla para función “Formación de espiras” en zona Rollos	52
Figura 38: Árbol de falla para función “Transporte de espiras con temperatura controlada” en zona Rollos	53
Figura 39: Árbol de falla para función “Formar bobinas” en zona Rollos	54
Figura 40: Árbol de falla para función “Transporte de rollos” en zona Rollos	55
Figura 41: Árbol de falla para función “Empaquetar rollos” en zona Rollos	56
Figura 42: Árbol de falla para función “Evacuación de rollos terminados”	57
Figura 43: Árbol de falla para función “Distribución óptima de fluido oleo hidráulico en zona de rollos” en zona de Rollos	58
Figura 44: Ajuste lineal para ventilador aire combustión	83
Figura 45: Confiabilidad para ventilador de aire combustión	84
Figura 46: Ajuste lineal para datos de sistema Kick-Off	85
Figura 47: Confiabilidad para sistema Kick-Off	86
Figura 48: Ajuste lineal para los datos de sistema de lubricación tren de desbaste	87
Figura 49: Confiabilidad para lubricación de desbaste	88
Figura 50: Ajuste lineal para datos de lubricación del Tren Medio	89
Figura 51: Confiabilidad para lubricación del Tren Medio	90
Figura 52: Ajuste lineal para datos Motor del Monoblock	91
Figura 53: Confiabilidad del Motor del Monoblock	92
Figura 54: Ajuste lineal datos sistema neumático Frenacola	93
Figura 55: Confiabilidad para Sistema neumático del Frenacola	94
Figura 56: Modelo de costo para ventilador de aire combustión	95
Figura 57: Modelo de costos para sistema Kick-Off	96
Figura 58: Modelo de costos para Lubricación de Tren de Desbaste	97
Figura 59: Modelo de costos para Lubricación Tren Medio	98
Figura 60: Modelo de costos para Motor del Monoblock	99
Figura 61: Modelo de costos para Sistema neumático del Frenacola	100
Figura 62: Variación de costos de mantenimiento correctivo para ventilador de aire combustión	108
Figura 63: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Ventilador de aire combustión	109
Figura 64: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Sistema Kick-Off	110
Figura 65: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Sistema Kick-Off	110
Figura 66: Variación de costos de mantenimiento correctivos para Lubricación Tren de Desbaste	112
Figura 67: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Lubricación Tren de Desbaste	113
Figura 68: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Lubricación Tren Medio	114
Figura 69: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Lubricación Tren Medio	114
Figura 70: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Motor del Monoblock	116
Figura 71: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Motor del Monoblock	116
Figura 72: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Sistema Neumático del Frenacola	118
Figura 73: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Sistema Neumático del Frenacola	118

1 INTRODUCCIÓN

La laminación de metales es un proceso de manufactura que genera distintos productos metálicos con formas variadas, abarcando desde láminas hasta perfiles.

En este caso, la planta de laminación trabaja con palanquillas de acero de sección transversal cuadrada de 130x130 [mm] y un largo de 12 [m].

En la industria resulta de vital importancia la generación de planes de mantenimiento acotados que permitan obtener el mejor funcionamiento de los equipos presentes en el proceso productivo. Ya sea, mejorando la disponibilidad de los equipos, como minimizando los costos asociados a las fallas de los equipos o los costos generados en su procedimiento de mantenimiento.

Los objetivos de este informe son los siguientes:

Objetivo Principal

- “Definir el plan de mantenimiento óptimo para los equipos críticos de una planta de laminación de metales”.

Objetivos Específicos

- Conocer en profundidad el proceso productivo, los equipos utilizados y sus factores operacionales y físicos.
- Levantar la información referente a históricos de fallas y funcionamiento interno de cada equipo. Definir la criticidad de cada equipo.
- Desarrollar un análisis de modo de falla, efecto y criticidad (FMECA) para cada equipo crítico.
- Definir un plan de mantenimiento acorde a los requisitos de cada equipo y los datos pertinentes.
- Definir la frecuencia óptima de inspecciones preventivas.

2 ANTECEDENTES

2.1 Estrategias de mantenimiento

Existen diversas estrategias de mantenimiento, las que se clasifican principalmente según el momento en que se lleva a cabo el proceso de mantención y el objetivo que este tiene. Además, es importante señalar que no existe una misma estrategia de mantención óptima para todos los procesos productivos, sino que depende de cada caso particular. En cada caso, actúan diversos factores que abarcan el ámbito operacional, seguridad ambiental y de los trabajadores, los costos de mantención, la frecuencia de fallas, entre otras. Estos factores cobrarán mayor o menor importancia considerando el objetivo impuesto por la empresa para la mantención. La estrategia puede estar enfocada a asegurar la operación de un equipo o en la minimización de los costos ocasionados por la falla mediante la disminución de la cantidad de fallas.

En términos generales, las estrategias de mantenimiento son las siguientes [1]:

- **Mantenimiento preventivo** o basado en las horas de operación.
- **Mantenimiento predictivo** o basado en la condición de las máquinas.
- **Mantenimiento proactivo** para evitar aparición o recurrencia de fallas. Atacan la causa de la falla y no el efecto de esta. Por esta razón, se debe aplicar a lo largo de toda la vida del equipo.
- **Mantenimiento reactivo o correctivo** que se aplica luego de aparecer una falla.

La Figura 1 muestra un esquema de las estrategias de mantenimiento, separadas de acuerdo a si realizan antes o después de la ocurrencia de la falla.

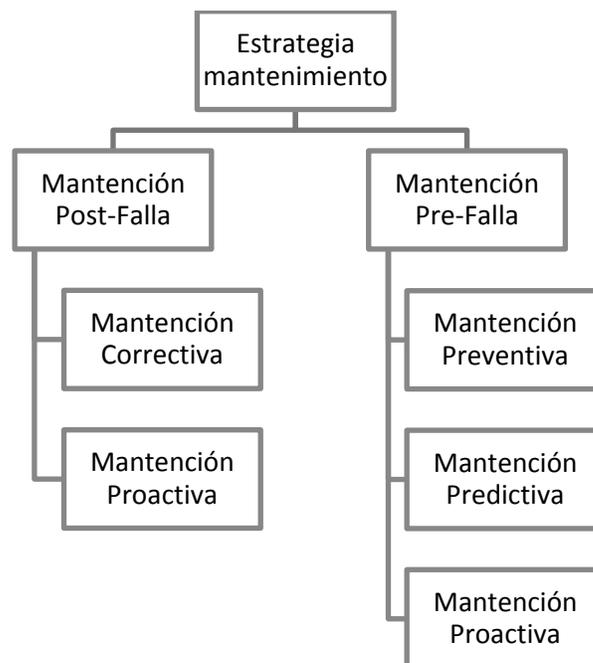


Figura 1: Esquema estrategias de mantenimiento

2.2 Análisis de criticidad

Existen diversas formas de definir la criticidad de los equipos. Sin embargo, y de manera independiente de la forma en que se realice, este análisis es crucial para obtener un buen plan de mantenimiento. Definiendo de manera correcta los equipos y/o modos de falla (Maneras posibles en las que puede fallar un equipo) es posible saber en qué enfocar la mantención.

En este trabajo de título se utilizarán básicamente el análisis de Árbol de Fallas y el análisis de modo de falla, efecto y criticidad (FMECA).

2.2.1 Árbol de Falla

El Árbol de Falla constituye un método deductivo en el cual se estudian las combinaciones de fallas en componentes que puedan desencadenar situaciones no deseadas en los equipos. Es muy útil para determinar probabilidades de ocurrencia, así como también para conocer a cabalidad el equipo en cuestión. La relación entre cada uno de los eventos y modos de falla se establece mediante la utilización de los conectores lógicos “Or” y “And” (“o” e “y” en español).

El evento principal a estudiar, es decir una falla o pérdida de funcionalidad, se encuentra en el tope del árbol representado por un rectángulo (Ver la Figura 2). A partir de este evento se comienzan a ramificar las posibles causas de la falla por medio de la utilización de los conectores lógicos previamente mencionados. Al final del árbol de fallas se encuentran los modos de falla que causan la falla descrita en el evento principal. Estos modos de falla representan las distintas maneras en las que puede fallar un componente determinado. En la Figura 2, se pueden visualizar como figuras circulares enumeradas desde el 1 hasta el 8.

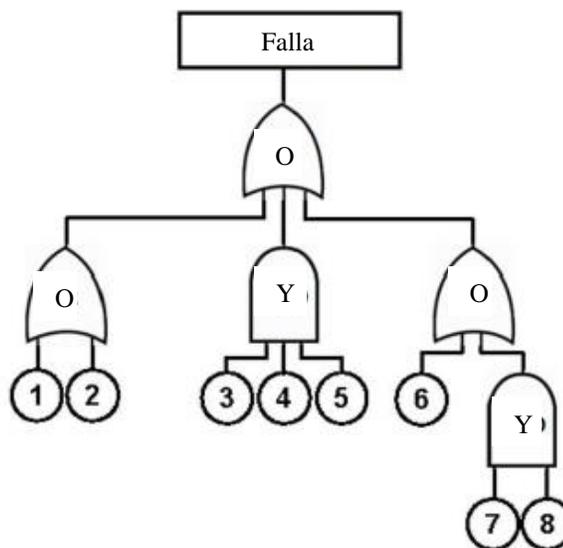


Figura 2: Imagen representativa de un árbol de fallas

Modificado de [1]

A continuación, para mayor claridad se presenta una tabla resumen con la simbología utilizada en la construcción de los árboles de falla y el significado que tiene cada uno de estos (Tabla 1).

Tabla 1: Resumen de símbolos utilizados en la construcción de árboles de falla

Símbolo	Significado
	Es el principal componente del árbol. Representa un evento negativo. Se ubica en la parte superior del árbol y a lo largo de éste para designar eventos que puedan seguirse dividiendo.
	Representa un evento base en el árbol y se encuentra en los niveles inferiores. Son el último eslabón de cada cadena. No requiere más divisiones.
	Evento terminal sin desarrollar.
	Se utiliza para transferir el desarrollo de una parte del árbol a otro sector. Por ejemplo, suelen ser muy útiles para no repetir el desarrollo de un mismo árbol.
	Corresponde al conector lógico "Y". En el árbol de falla indica que para que ocurra un evento determinado se deben cumplir todas y cada una de las condiciones anexadas a este símbolo.
	Corresponde al conector lógico "O". En el árbol de falla indica que para que ocurra un evento determinado se debe cumplir al menos una de las condiciones anexadas a este símbolo.

Fuente: R. Pascual: "El arte de mantener", Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, Edición 2.8, Santiago, 2005.

2.2.2 FMECA

El FMECA corresponde a un tipo de análisis de criticidad que considera cada componente del sistema. Para cada componente analiza los posibles modos de falla y define sus causas y efectos referentes a una función específica (En la Figura 3 puede verse el flujo de la estructura de información en la construcción de FMECA). Es uno de los métodos más utilizados. En relación con el árbol de falla (y en general para los otros métodos de análisis de fallas existentes) corresponde a uno de los más detallados y certeros. El objetivo detrás del FMECA, es abarcar la mayor cantidad de escenarios de fallas posibles estudiando acuciosamente los distintos componentes del sistema analizado. La idea es generar un barrido por cada sistema y sub-sistema del equipo pasando por cada componente y contemplando todos los modos de fallas. Lo importante es que no sólo nombra los modos de falla, sino también analiza sus causas, efectos y las tareas que pueden ser realizadas para minimizar su ocurrencia y/o su consecuencia. Por otra parte, permite establecer qué modo de falla es más crítico dentro del equipo, entregando directrices para generar un estudio posterior al componente que propicia ese modo de falla.

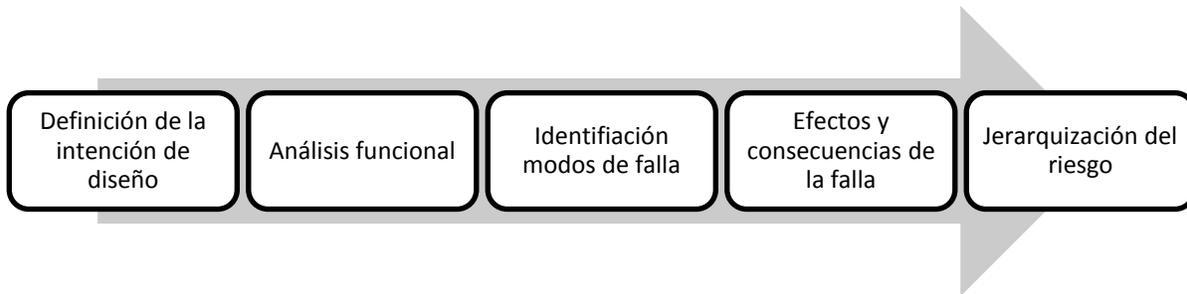


Figura 3: Flujo representativo de la estructura de la información en la construcción de un FMECA

2.3 Confiabilidad

2.3.1 Conceptos básicos

La Confiabilidad (denotada por la letra $R(t)$) se define como la probabilidad de que el equipo o componente no falle en un intervalo de tiempo determinado. Por otra parte, se define la Probabilidad acumulada de falla (denotada por $F(t)$) como la probabilidad de que un equipo o componente falle en el intervalo de tiempo determinado. Además se precisa el concepto de Densidad de probabilidad de falla (denotada por $f(t)$) y corresponde a la probabilidad instantánea de que un equipo o componente que no ha fallado sí lo haga en un intervalo $[t, t+dt]$. [1]

En este mismo contexto, un concepto muy importante es la Tasa de Falla que corresponde a la cantidad esperada de fallas para un equipo o componente por unidad de tiempo.

Por otra parte, se define el concepto de Tiempo Medio Para Fallar (TMPF) o en inglés Mean Time To Failure (MTTF) y corresponde al tiempo esperado para que un equipo o componente fallen. También es conocido como la vida media. [1]

Otros términos importante en la vida de los componente son el tiempo que transcurre entre cada una de las fallas (MTBF: Mean Time Between Failure) y el tiempo que tarda cada detención (MDT: Mean Detention Time). El MDT se compone a su vez del tiempo en que tarda la reparación y el tiempo de espera aparejado a, por ejemplo, retrasos en entrega de repuestos (MTTR: Mean Time To Repair y MWT: Mean Waiting Time). Entonces, un ciclo de un componente sería como el presente en el esquema de la Figura 4. [1]

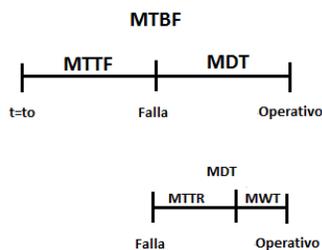


Figura 4: Esquema representativo de los tiempos implícitos en la vida de un componente

Dentro de los modelos estadísticos de confiabilidad utilizados se cuenta con el modelo exponencial, modelo normal, distribución binomial, distribución de Poisson y el modelo de Weibull. Para el desarrollo de este trabajo se propone la aplicación del modelo de Weibull basado en los completos históricos de fallas con los que se cuenta. Además de la gran flexibilidad del modelo y la utilidad que entregan los parámetros obtenidos para estudios posteriores. De esta forma, los conceptos, factores y el modelo definidos anteriormente corresponden a un puntal principal a la hora de determinar un plan de mantenimiento. Además de los tiempos y probabilidades implícitas en el problema son importantes los costos asociados. [4]

2.3.2 Modelo de Weibull

En primer lugar, cabe mencionar que la tasa de fallas ($\lambda(t)$) está dada por la siguiente expresión [2]:

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

Donde:

$(t-\gamma) \geq 0$ y γ es el parámetro de inicio (en unidades temporales).

$\beta > 0$ es el parámetro de forma.

$\eta > 0$ es el parámetro de escala (en unidades temporales).

Además se tienen las siguientes expresiones:

- Confiabilidad ($R(t)$)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

- Probabilidad acumulada de falla ($F(t)$)

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

- Densidad de probabilidad de falla ($f(t)$)

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

- Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (5)$$

Donde “ Γ ” Corresponde a la función Gamma.

2.4 Estructura de costos

A la hora de hablar de la definición de un plan matriz de mantenimiento resulta vital establecer los costos asociados a cada ítem presente en el proceso de mantenimiento.

De manera general, los costos asociados al proceso de mantenimiento son los siguientes:

- **Costos de intervención (Ci):** Costos relacionados en la mantención misma (Costo de mano de obra, costos de materiales fungibles, entre otros)
- **Costos de fallas (Cf):** Costo que se genera al cesar la producción debido a la ocurrencia de una falla en particular. Puede ser una detención total de la planta o una merma en la producción. Engloba tanto los costos para suplir la producción perdida como el valor de las horas que se han dejado de producir.
- **Costos de almacenamiento (Ca):** Corresponde al costo de mantener en almacenamiento (Stock) los repuestos necesarios para solucionar una falla.
- **Costos por sobreinversión (Csi):** Corresponden a inversiones realizadas en etapa de diseño de un equipo para disminuir la probabilidad de falla en un futuro.
- **Costo global (Cg):** Corresponde a la suma de los costos mencionados anteriormente.

Al generar un plan de mantención matriz óptimo se busca minimizar el costo global (En la mayoría de los casos). Esto puede verse reflejado en la Figura 5 [1].

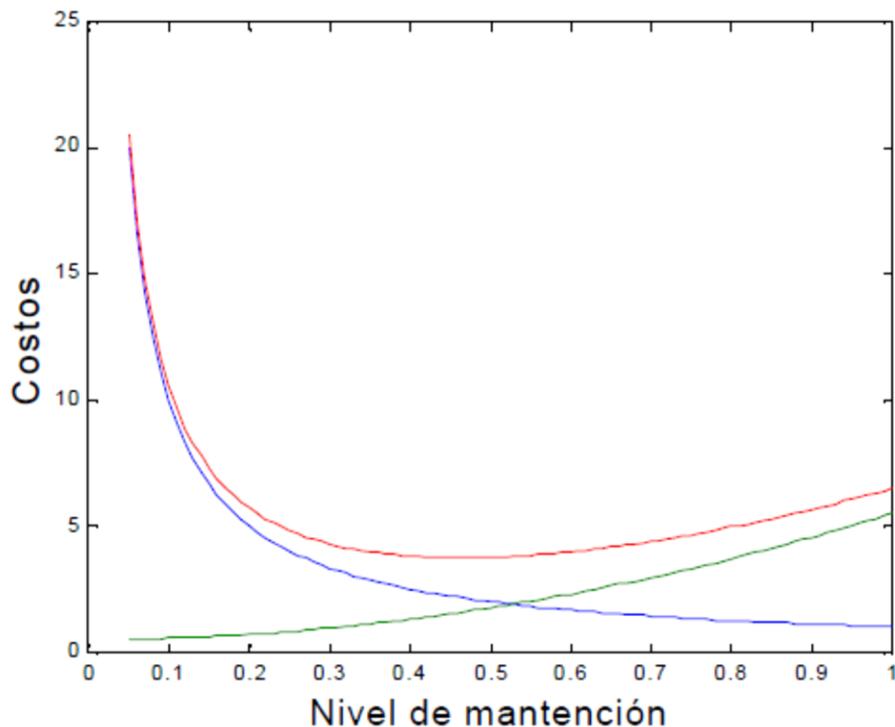


Figura 5: Costo global (Curva roja), costo de falla (Curva azul) y costo de intervención (Curva verde)

2.5 Selección de estrategias de mantenimiento

La selección de la estrategia de mantenimiento depende de factores mencionados anteriormente, tales como las frecuencias de fallas, los costos asociados a estas y parámetros de Weibull.

Por otra parte, cada estrategia de mantenimiento tiene sus propias consideraciones respecto a tiempos de intervención o al objetivo de la intervención.

En este sentido, la Figura 6 [1] refleja un árbol de definición que permite definir de manera simple, pero efectiva, la estrategia de mantenimiento. En este esquema, C_{pr} , C_c , C_p corresponden al costo predictivo, costo correctivo y costo preventivo respectivamente. Así como también, los valores β , η y γ corresponden a los parámetros de Weibull. [2]

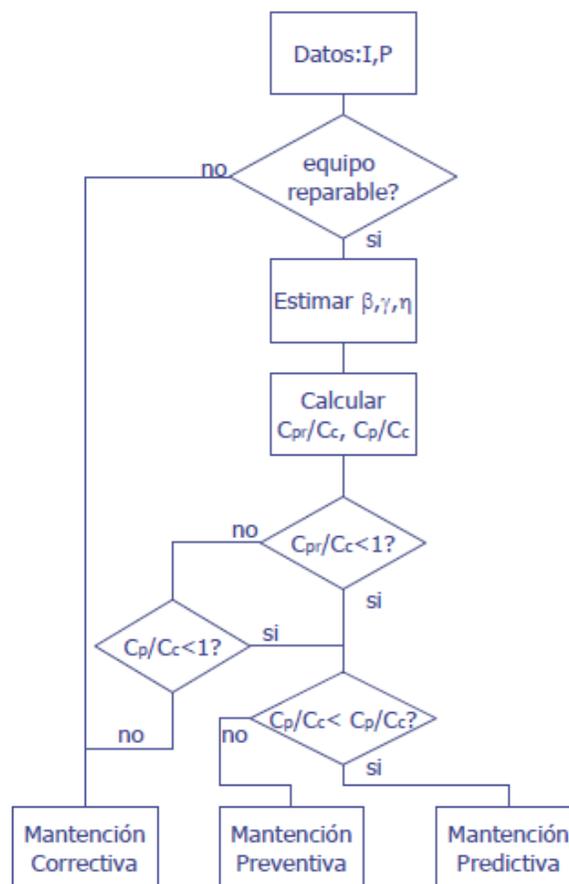


Figura 6: Flujo de decisión para selección de estrategia de mantenimiento

La razón entre el costo global preventivo y el costo global correctivo ($C_{g,p}$ y $C_{g,c}$ respectivamente) está dada por [2]:

$$\frac{C_{g,p}}{C_{g,c}}(T_s, \alpha_r, \beta, \eta, \gamma) = \frac{1 + [1 - R(T_s)]\alpha_r}{1 + \alpha_r} \frac{MTBF}{\int_0^{T_s} R(t)dt} \quad (6)$$

Donde T_s es el tiempo de mantenimiento, α_r es la razón entre el costo de falla y el costo de intervención. Además β , η y γ son los parámetros de Weibull. Por otra parte, α_r corresponde a la razón entre costo de intervención preventiva y costo de intervención correctiva.

Aplicándolo particularmente al modelo de Weibull, se tiene lo siguiente [2]:

$$\frac{C_{g,p}}{C_{g,c}} = \frac{e^{-xp^\beta}(\alpha - 1) + 1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (7)$$

Donde $\Gamma(1+1/\beta)$ corresponde a la distribución Gamma.

Por otra parte, se tiene:

$$X_p = \frac{t - \gamma}{\eta} \quad (8)$$

2.6 Frecuencia óptima de inspecciones

Para definir las frecuencias óptimas de inspección en primer lugar es necesario determinar qué tan sensibles son las tasas de falla a la realización de las inspecciones. De ser sensibles se debe seleccionar el modelo adecuado (por ejemplo, deben considerar si domina el costo de falla mínimo o la disponibilidad). Luego se calculan los costos globales con el objetivo de minimizarlos. Finalmente, se selecciona la estrategia óptima.

Minimización del costo global sin detención de equipo por inspección [1]

Para una distribución de Weibull, la frecuencia óptima de inspección está dada por la expresión (9):

$$f^* = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha(1+\frac{1}{\beta})}\right) \frac{MTTR}{MTTI} \left(\frac{C_f + C_{i,r}}{C_{i,i}}\right)} \quad (9)$$

Donde MTTR es el tiempo medio para reparar, MTTI es el tiempo medio de intervención, C_f es el costo a falla, el $C_{i,r}$ es el costo de intervención reparaciones y $C_{i,i}$ es el costo de intervenciones de inspección.

Por otra parte, el parámetro de Weibull η (parámetro de escala) se considera dependiente de la frecuencia de inspección. Este parámetro está dado por:

$$\eta = \alpha * f \quad (10)$$

2.7 Sobre planta de laminación

La laminación de metales es un proceso de manufactura que genera distintos productos metálicos con formas desde láminas hasta perfiles.

En este caso, la planta de laminación trabaja con palanquillas de material de sección transversal cuadrada de 130x130 [mm] y un largo de 12 [m].

La palanquilla es inicialmente precalentada en un horno a gas que eleva su temperatura a 1200 °C. Posteriormente, la palanquilla ingresa al tren de desbaste y laminación donde su sección transversal es disminuida y transformada por medio de 25 pares de cilindros de desbaste (La cantidad de cilindros utilizados depende del producto final).

Luego de la zona de laminación la línea de producción se divide en “Formación de Barras” y “Formación de Rollos” donde se obtienen barras para refuerzo de hormigón y rollos de alambón, respectivamente.

La Figura 7 presenta una imagen referencial de la planta de laminación en estudio.

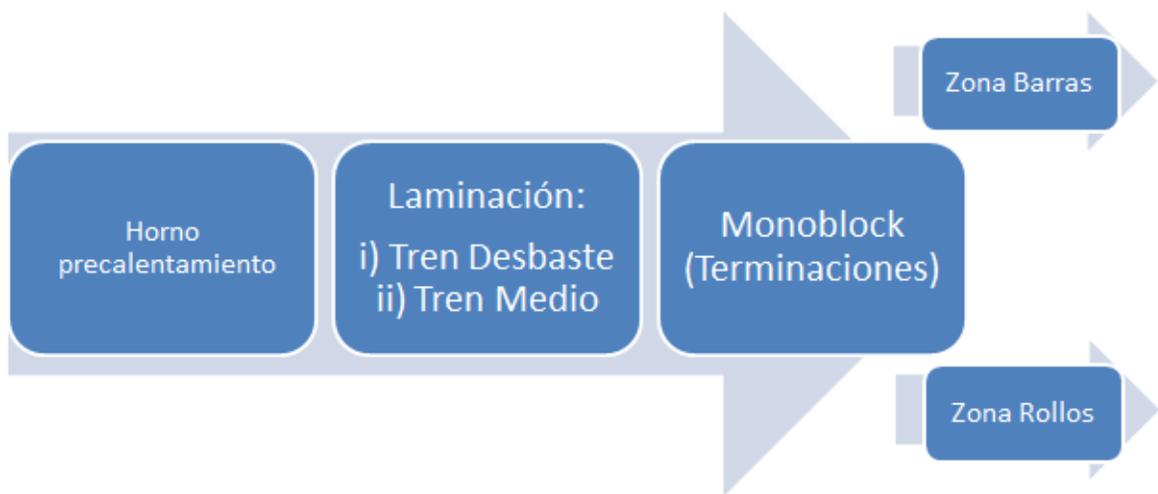


Figura 7: Esquema del proceso de laminación (Fuente: Elaboración propia)

3 DESARROLLO

La metodología a seguir para lograr los objetivos planteados se dividen en las siguientes etapas:

3.1 Reconocimiento del problema y conocimiento de la planta (Etapa I)

En primer lugar, es de vital importancia comprender a cabalidad el problema en cuestión. Para ello se acuerdan reuniones con los encargados de la planta de laminación definida para trabajar.

Una vez entendidos los problemas y requisitos de la empresa es menester conocer en profundidad el proceso productivo. Para ello, se generan diferentes instancias, tales como: Visitas guiadas a la planta (reiteradas) y estudio de cada equipo. El estudio de los equipos no sólo se lleva a cabo en terreno, sino que se revisan los manuales de cada uno para entender su funcionamiento.

En esta etapa se propone una división de las líneas de producción, sectorizando la planta en 7 zonas distintas.

Las distintas zonas en las que se ha dividido la planta y los equipos para cada una se muestran a continuación:

a) Zona Horno Pre calentamiento

1. Parrilla de carga
2. Transferidor palanquilla
3. Camino de rodillos hacia el horno
4. Compuerta entrada horno
5. Camino de rodillos entrada interior horno
6. Soleras móviles
7. Sistema de extracción “Kick-Off”
8. Rodillos internos de salida
9. Compuerta salida del horno
10. Sistema combustión
11. Central hidráulica Horno

b) Zona Desbaste y Tren Medio

1. Camino de rodillos salida del horno
2. Sistema de extracción palanquilla dañada
3. Tope a desaparecer
4. Arrastrador
5. Cajas de desbaste horizontal D1, D3 y D5
6. Cajas de desbaste verticales D2, D4 y D6
7. Cajas de laminación tren medio horizontales M7, M9, M11 y M13
8. Cajas de laminación tren medio verticales M8, M10, M12 y M14
9. Formadores de bucle (Lazo) tren medio
10. Cizalla 1
11. Mesa de apoyo para cambio de cajas

c) Zona lubricación Laminación

1. Central Nortek (Lubricación D1, D2 y D3)
2. Central 2 (Lubricación D4, D5, D6, M7 y M8)
3. Central 1 (Lubricación M9, M10, M11, M12, M13 y M14)
4. Central lubricación Aire-Aceite
5. Sistema refrigeración M13 y M14
6. Central hidráulica Zona laminación

d) Zona Block terminación

1. Cizalla (CVS2)
2. Block terminación
3. Central lubricación del reductor del Monoblock

e) Zona Rollos

1. Formador de espiras
2. Sistema de Enfriamiento controlado de espiras
3. Formador de bobinas
4. Mesa transportadora de bobinas (Traslación y rotación)
5. Enzunchadora
6. Mesa volteadora
7. Mesa pesaje y recogida
8. Central hidráulica Zona Rollos

f) Zona Barras

1. Arrastrador
2. Cizalla (CVS3 y CVS4)
3. Frenabarras 1 y 2 (Frenacolas)
4. Canaleta rotativa
5. Mesa enfriamiento
6. Transferidor de cadenas
7. Biguetas
8. Mesa de rodillos (Previa a cizalla corte en frío)
9. Cizalla corte en frío
10. Tope corte a la medida
11. Camino de rodillas (Posterior a cizalla corte en frío)
12. Transferidor de cadenas
13. Transferidor excéntrico
14. Cuna receptora de fajos
15. Mesa de rodillos previa a enzunchadora
16. Enzunchadora
17. Camino de rodillos (Posterior a la enzunchadora)
18. Transferidor de cadenas y báscula

A pesar de generar esta división de 7 zonas, se ha convenido con la empresa estudiar 5 zonas que según los propósitos particulares de la organización son más importantes.

3.2 Análisis de fallas y criticidad (Etapa II)

Luego de conocer cómo funciona la planta, sus líneas de producción y cada uno de los equipos que la componen se debe comenzar con el análisis de fallas y criticidad. En primer lugar, se realizan árboles de fallas para detectar de manera rápida los diferentes modos de falla que puedan generar detenciones totales o parciales en la producción. Para cada zona se realizan árboles distintos según las funciones definidas en cada sector.

Una vez realizados los árboles de falla se procede a conseguir los históricos de falla de la planta de laminación. Con estos datos es posible calcular la criticidad de las diferentes fallas. Con el fin de agilizar el trabajo, en conjunto con los encargados de la planta se han definido cinco zonas de interés y estudio. Estas zonas (que son parte de las siete zonas definidas con anterioridad) contienen los elementos más críticos para la producción basados en la experiencia de los encargados.

El análisis de criticidad, entonces, se divide en 5 zonas. Cada zona cuenta con equipos y sub-equipos. En base a los históricos de falla, y a la experiencia de trabajadores y encargados, se genera una matriz de criticidad basada en la implicancia que representan la frecuencia de falla, el costo de detención por falla, la implicancia en la producción (operacional) de cada falla, la flexibilidad con la que se cuenta a la hora de la falla y finalmente los factores medioambientales y de seguridad. De esta forma, se abarcan de manera global los aspectos preponderantes para la empresa (Expresamente detallados en su misión y visión) y se consigue un estudio de criticidad bastante acertado y neutral.

El resultado del análisis de criticidad es un conjunto de cinco equipos (o sub-equipos), para los cuales se realizará un FMECA.

3.2.1 Árboles de falla

En primer lugar, se realiza un reconocimiento general del proceso llevado a cabo en la planta y un acercamiento a los equipos utilizados.

Posteriormente, con ayuda de la documentación presente en las oficinas de la planta, se genera un listado de cada uno de los equipos a analizar. Al mismo tiempo, se generan subdivisiones de equipos según la etapa del proceso en la cual se encuentran inmersos.

El análisis de los equipos se realiza de manera secuencial según su etapa en el proceso y el orden en el cual son utilizados. De esta forma, se busca la comprensión total del proceso en sí y, más aún, la comprensión de diferentes modos de fallas que puedan explicarse por fenómenos exclusivos del proceso. Dichos fenómenos no poseen su explicación en la física del equipo, sino más bien en el uso que éste recibe y la línea de producción a la que sirve.

Para lograr la determinación de los modos de falla, entonces, se utiliza un conocimiento “*in-situ*” del proceso y sus equipos. Así como también, la documentación de planos y manuales de mantenimiento presentes en las oficinas de la planta.

Para un análisis más simple, pero a la vez efectivo, se define la utilización de árboles de falla. Los cuales tratan los eventos que converjan en la pérdida de producción total o en la pérdida inequívoca de la calidad del producto.

De este modo, cada subsector contiene uno o más árboles de falla detallando los modos de falla aparejados y las máquinas presentes en el proceso.

3.2.2 Matriz de criticidad

Debido a las restricciones que subyacen a este trabajo de título y, de acuerdo a las conversaciones sostenidas con los encargados de la empresa y los profesores de la comisión se ha determinado trabajar con sólo cinco equipos críticos de la planta.

El primer paso, consiste entonces en determinar cuáles serán estos cinco equipos críticos tomando en cuenta los alrededor de 100 equipos existentes en el proceso. Para esto, se ha generado una matriz de criticidad basada en diversos factores. A continuación se detalla el procedimiento seguido para seleccionar los equipos.

Para comenzar, la empresa facilita un histórico de fallas con un horizonte temporal de 39 meses (alrededor de treinta mil datos). Este historial se encuentra en un formato disponible para el software “Excel” de Microsoft Office. En base a filtros (por zonas y equipos) se genera una lista de los diversos equipos de interés.

A cada uno de estos equipos se le otorga un puntaje según su injerencia en frecuencia, costos, seguridad y medio ambiente, flexibilidad operacional e implicancia operacional. Luego se generan dos modelos distintos para definir la criticidad.

Finalmente, se comparan ambos modelos y se escoge el modelo más completo y que mejor refleje la realidad según lo observado empíricamente por los encargados de la planta. Para terminar se definen los 5 equipos críticos a trabajar.

A continuación se presentan en detalle los dos modelos utilizados:

Modelo 1: Fórmula de consecuencia

El primer modelo, desarrollado por la consultora inglesa The Woodhouse Partnership Limited [6] considera tratar estos puntajes mediante la siguiente fórmula:

$$Criticidad = Frec * Consecuencia$$

$$Criticidad = Frec * [(Op + FOp) + SMA + COST]$$

Donde:

Frec: Puntaje de frecuencia otorgado al equipo “i”.

Op: Puntaje operacional otorgado al equipo “i”.

FOp: Puntaje de flexibilidad operacional otorgado al equipo “i”.

SMA: Puntaje de seguridad y medio ambiente otorgado al equipo “i”.

COST: Puntaje de costo otorgado al equipo “i”.

- La frecuencia se calcula considerando la cantidad de fallas de cada equipo en el horizonte temporal del histórico de falla (39 meses). El puntaje de frecuencia se asignará de la siguiente forma (Los rangos fueron definidos según los datos obtenidos. Ver Tabla 2):

Tabla 2: Puntaje asignado para frecuencia

Criterio Frecuencia	
Rango [#Fallas/Tpo]	Puntaje
0 a 0,2	2
0,2 a 0,3	4
0,3 o más	6

Fuente: Elaboración propia.

- Los costos por fallas se estimaron según la siguiente expresión (Facilitada y utilizada en la empresa en cuestión):

$$C_i = M \times I \times P$$

Dónde:

Ci: Costo de intervención

M: Margen

I: Interrupciones

P: Productividad

Los valores asignados a Margen y a Productividad son confidenciales y no se expondrán en este informe.

Luego, el criterio utilizado para asignar los puntajes de costo a cada equipo se presentan en la Tabla 3. Estos valores fueron definidos según los costos obtenidos para cada falla. ([um]: Unidad monetaria. Se utiliza esta unidad para resguardar información de la empresa)

Tabla 3: Criterio utilizado para asignar los puntajes de costos

Criterio Costos	
Rango [um]	Puntaje
0 a 1000	1
1000 a 3000	2
3000 a 5000	4
5000 a 10000	6
10000 a 30000	8
30000 o más	10

Fuente: Elaboración propia.

- El criterio utilizado para el impacto medioambiental y de seguridad se entrega a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4: Criterio utilizado para asignar puntajes de impacto ambiental, seguridad e higiene

Impacto en seguridad, ambiente e higiene	
Falla causará	Puntaje
Falla no genera un riesgo perceptible para la seguridad de trabajadores o medioambiente	2
Falla genera un riesgo menor controlable	4
Falla genera riesgo serio controlable	6
Falla genera riesgos incontrolable con recursos actuales	8
Falla genera riesgo incontrolable con consecuencia catastrófica	10

Fuente: Elaboración propia.

Los valores son asignados a cada equipo según la experiencia de mantenedores y operadores

- El criterio utilizado para impacto operacional se presenta en la Tabla 5:

Tabla 5: Criterio utilizado para asignar puntajes de impacto operacional

Criterio Impacto operacional	
Falla causará	Puntaje
Parada de toda la planta prolongado	10
Parada de toda la planta poco tiempo	8
Restringe producción por tiempo prolongado	6
Restringe producción por poco tiempo	4
Efecto menor en producción	2
Efecto insignificante en producción	1

Fuente: Elaboración propia.

Este factor es muy importante para el desarrollo de la matriz de criticidad, razón por la cual se ha estudiado meticulosamente cada caso y los puntajes han sido asignados por los encargados de mantención de la planta de laminación.

- El criterio utilizado para definir el factor de flexibilidad utilizado se presenta en la Tabla 6:

Tabla 6: Criterio utilizado para asignar el puntaje según la flexibilidad operacional

Criterio Flexibilidad Operacional	
Opción	Puntaje
No existe opción operacional ni de repuesto	4
Hay función de repuesto compartido	2
Hay función de repuesto	1

Fuente: Elaboración propia.

- Luego, según los puntajes definidos para cada criterio y la fórmula que rige el modelo es posible generar la siguiente matriz de criticidad. En la Figura 8 se muestra la matriz y el criterio de criticidad.

F r e c u e n c i a	6	60	120	180	240	300	360
	5	50	100	150	200	250	300
	4	40	80	120	160	200	240
	3	30	60	90	120	150	180
	2	20	40	60	80	100	120
	1	10	20	30	40	50	60
		10	20	30	40	50	60
	Consecuencia						

Crítico	> 120
Semicrítico	60-120
No crítico	0-60

Figura 8: Matriz de criticidad definida para el modelo 1 y el criterio utilizado

Modelo 2: Ponderaciones

El segundo modelo considera tratar los puntajes por medio de ponderaciones acordadas con los encargados de la planta de laminación según la importancia que consideran debe tener cada factor. Estas ponderaciones se exponen a continuación:

$$Criticidad = 0,2 * (Frec + SMA + COST) + 0,4 * OP$$

Los criterios utilizados para asignar los puntajes en cada ámbito de impacto son los mismos expuestos anteriormente para el Modelo 1. Sin embargo, en acuerdo con los encargados de la planta se ha acordado desestimar la utilización de un puntaje de flexibilidad operacional. La idea es que este puntaje sea “absorbido” por el puntaje de impacto operacional.

En este caso, al tratarse de ponderaciones, no se tiene una matriz de criticidad bien definida como en el Modelo anterior. Sin embargo, es posible generar una escala de criticidad considerando el máximo valor posible según el modelo de ponderaciones. En la Tabla 7 se presenta la escala utilizada para la criticidad.

Tabla 7: Escala utilizada para definir criticidad según el modelo

No crítico	0 - 2,3
Semi-Crítico	2,3 - 4,6
Crítico	4,6 - 9,2

3.2.3 FMECA

La confección de los distintos FMECA se llevan a cabo directamente en conjunto con los mantenedores de los equipos seleccionados anteriormente gracias a la matriz de criticidad y los árboles de falla construidos en un comienzo.

Cada equipo es estudiado según su funcionalidad y la implicancia que tiene cada componente en ella. Los distintos modos de fallas obtenidos son analizados según sus efectos y se proponen distintas tareas para remediarlos o evitarlos en un futuro.

3.3 Definición plan de mantenimiento (Etapa III)

En esta etapa se procede a generar un modelo ad-hoc para definir un plan de mantenimiento óptimo para los equipos críticos de la planta de laminación. Cabe destacar que este modelo se genera en base a factores tales como frecuencias de falla, costos de mantención, costos de almacenamiento, costos de falla, objetivos de la empresa y factores operacionales.

Previo a la definición del plan matriz es necesario obtener los parámetros de Weibull para cada uno de los equipos críticos y definir el modelo de costo a utilizar. Además, se requiere definir una estrategia de gestión de repuestos. Considerando la criticidad del repuesto en cuestión, los costos asociados y los tiempos implícitos en su llegada a la planta.

Esta etapa constituye uno de los puntos críticos dentro del trabajo de título y, como se mencionó, está sujeto a muchas variables. Es recomendable hacer un estudio detallado de las condiciones obtenidas a lo largo de las etapas previas de modo de generar el mejor plan posible.

3.3.1 Estimación parámetros de Weibull

Para generar una correcta estimación de los parámetros de Weibull es necesario realizar el siguiente método [2]:

- En primer lugar, se debe considerar el parámetro gamma (Υ) igual a cero.
- Posteriormente, se debe considerar el siguiente ajuste lineal:

$$X = Ln(t) \quad (10)$$

$$Y = Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) \quad (11)$$

- Luego, se pretende graficar X versus Y. Para ello es necesario definir la cantidad F(t), la cual puede ser establecida por el método de los rangos medios o el método de los rangos medianos.

- Método de los rangos medios:

$$F_i = \frac{i}{n+1} \quad (11)$$

- Método de los rangos medianos:

$$F_i = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (12)$$

Donde “n” representa la cantidad de datos

- Una vez obtenidos X e Y se deben graficar y generar el ajuste lineal pertinente. De esta manera se obtienen la pendiente (A) y el coeficiente de posición (B) de la recta.

- Se calculan los parámetros de Weibull Beta (β) y Eta (η) según las siguientes expresiones:

- Parámetro Beta:

$$\beta = A \quad (13)$$

- Parámetro Eta:

$$\eta = e^{-\frac{B}{A}} \quad (14)$$

- Una vez obtenidos los parámetros Beta y Eta se procede a calcular la confiabilidad según Weibull. Utilizando:

- Confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (15)$$

- Se calcula la probabilidad acumulada de falla (F) y se obtiene la diferencia con el valor F_i . Se obtiene el módulo de la diferencia calculada y se optimiza por medio de la herramienta “Solver” de Excel minimizando la suma de las diferencias y variando los parámetros de Weibull.
- Para corroborar que el ajuste es adecuado se debe realizar un test de validación. Según la cantidad de datos, se utiliza Kolmogorov-Smirnov o Chi-Cuadrado (Para pequeñas y grandes cantidades de datos, respectivamente).

3.3.2 Selección de estrategia de mantenimiento

Para la selección de estrategia de mantenimiento se consideran los costos asociados a intervenciones por mantenimiento preventivo y correctivo para cada uno de los equipos críticos.

Estos costos han sido considerados según las órdenes de trabajo proporcionadas por los encargados de mantenimiento de la planta de laminación en cuestión.

Una vez calculados los costos de intervención preventivos y correctivos se calcula el parámetro “alpha” que corresponde a la razón entre el costo de intervención preventivo y correctivo.

Luego, tomando en cuenta los parámetros de Weibull para los equipos críticos y el parámetro alpha se procede a definir la estrategia de mantenimiento buscando el mínimo en el gráfico dado por la razón entre costo global preventivo y correctivo y el parámetro “ X_p ”. El parámetro X_p corresponde a una variable auxiliar en base a los parámetros de Weibull definida por la expresión (8) en la sección “2.5 Selección de estrategias de mantenimiento”.

Cuando el valor del mínimo es menor que 1, se selecciona una estrategia de mantenimiento preventiva. De lo contrario, se define una estrategia correctiva. Cuando el valor es muy similar a uno el análisis no es concluyente.

Finalmente, si la estrategia seleccionada es preventiva se procede a estimar el tiempo óptimo de intervenciones preventivas. Esto despejando el parámetro tiempo “ t ” de la expresión (8) para el mínimo obtenido anteriormente.

3.3.3 Frecuencia de inspecciones

Para la estimación de frecuencia de inspecciones se consideran los costos de falla y los costos de intervención de mantenimiento correctivos y los costos de intervención debido a la inspección. Se considera sólo los costos de intervención de inspección debido a que se propone una estrategia de inspección visual o, cualquier inspección que no implique la detención del equipo en cuestión.

En el caso del costo de intervenciones correctivas se ha acudido a los costos presentes en las órdenes de trabajo facilitadas por la planta de laminación en cuestión. En tanto que los costos de intervenciones de inspección se han considerado el costo de Horas Hombre y un porcentaje del costo de intervención correctiva (porcentaje del 33,3% del costo de intervención correctiva).

Una vez definidos estos costos se procede a estimar los parámetros MTTR de falla para cada equipo crítico. Es importante recalcar que se ha asumido una igualdad entre MTTR y MTTL. Además, se ha considerado un valor de frecuencia de inspección inicial dado por la cantidad de intervenciones correctivas mensuales.

Finalmente, lo expuesto anteriormente en conjunto con los parámetros de Weibull se procede a calcular la frecuencia óptima de inspecciones de acuerdo a la expresión (9).

4 RESULTADOS

4.1 Árboles de Falla

Los árboles de falla para cada zona se presentan a continuación.

4.1.1 Zona Horno Pre calentamiento

La pérdida de función en esta zona está relacionada con la salida inexistente de palanquilla (desde el horno) o con la calidad deficiente de ésta misma para ingresar al proceso de laminación.

Entonces, los eventos que producen detención en la producción son, por ejemplo: Salida inexistente de palanquilla, palanquillas deformes o palanquillas con temperatura inferior a 1200 °C.

Los árboles de falla para esta zona se presentan en las Figura 9 a 14.

4.1.2 Zona tren de desbaste y tren medio

La pérdida de función para esta zona está asociada con la imposibilidad de laminar la palanquilla. Esto puede darse por diversos factores, tales como que la palanquilla no ingrese a las cajas de laminación, que la palanquilla no sea laminada por problemas en las cajas o que la palanquilla presente problemas entre cajas de laminación (por ejemplo, en los formadores de bucle).

Los árboles de falla de esta zona se encuentran en las Figura 14 a 22.

4.1.3 Zona Lubricación laminación

La pérdida de función para esta zona está asociada con la carencia de aporte de aceite, grasa o fluido de lubricación a los diferentes equipos de la Zona de desbaste y tren medio. Principalmente se basa en el aporte de fluido lubricante a los reductores de las cajas de desbaste y laminación. Esta situación corresponde a un punto crítico en el proceso y no sólo incurre en un cese de la producción, sino también en la potencial pérdida de equipos vitales como los reductores.

Los árboles de falla para esta zona se encuentran en las Figura 22 a 27.

4.1.4 Zona Block terminación

La pérdida de función en esta zona está relacionada con el correcto funcionamiento de los motores M15 y M16, del reductor y el sistema mecánico que transmite el movimiento de los motores a los stands de laminación. Es de vital importancia la lubricación del reductor.

Los árboles de falla para esta zona se encuentran en las Figura 27 a 30.

4.1.5 Zona Barras

La pérdida de funcionalidad para esta zona está dada por la imposibilidad de producir el fajo de barras con las especificaciones definidas. Así como también, la pérdida de calidad en el producto final. Resultan importantes equipos como el frenabarras, la mesa de enfriamiento y la cizalla de corte en frío.

Los árboles de falla para esta zona se encuentran en las Figura 30 a 37.

4.1.6 Zona Rollos

La pérdida de función para esta zona corresponde a la imposibilidad de producir un rollo adecuadamente enrollado y empacado. Además, se considera la pérdida de calidad del producto terminado.

Los árboles de falla para esta zona se encuentran en las Figura 37 a 44.

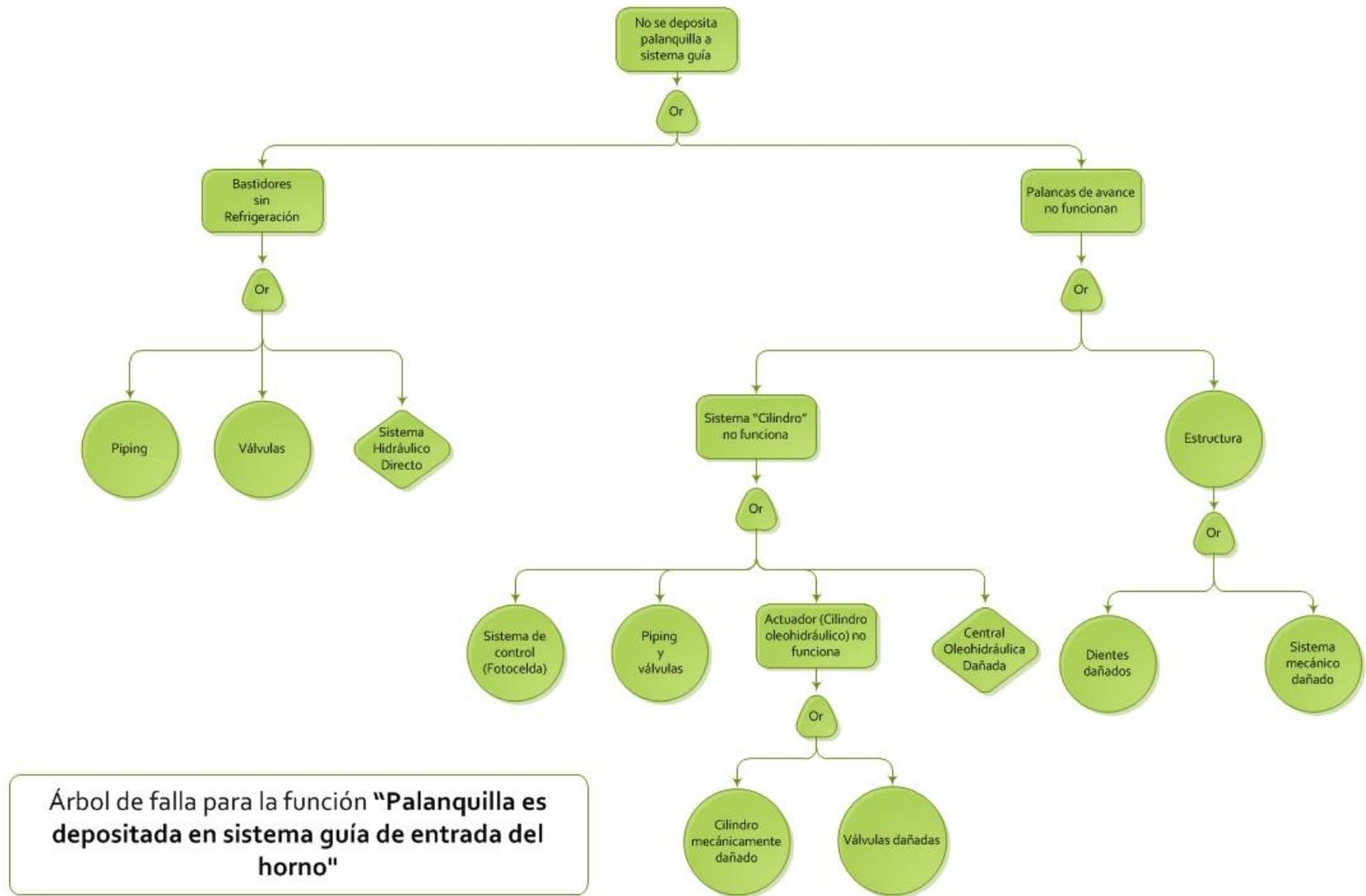
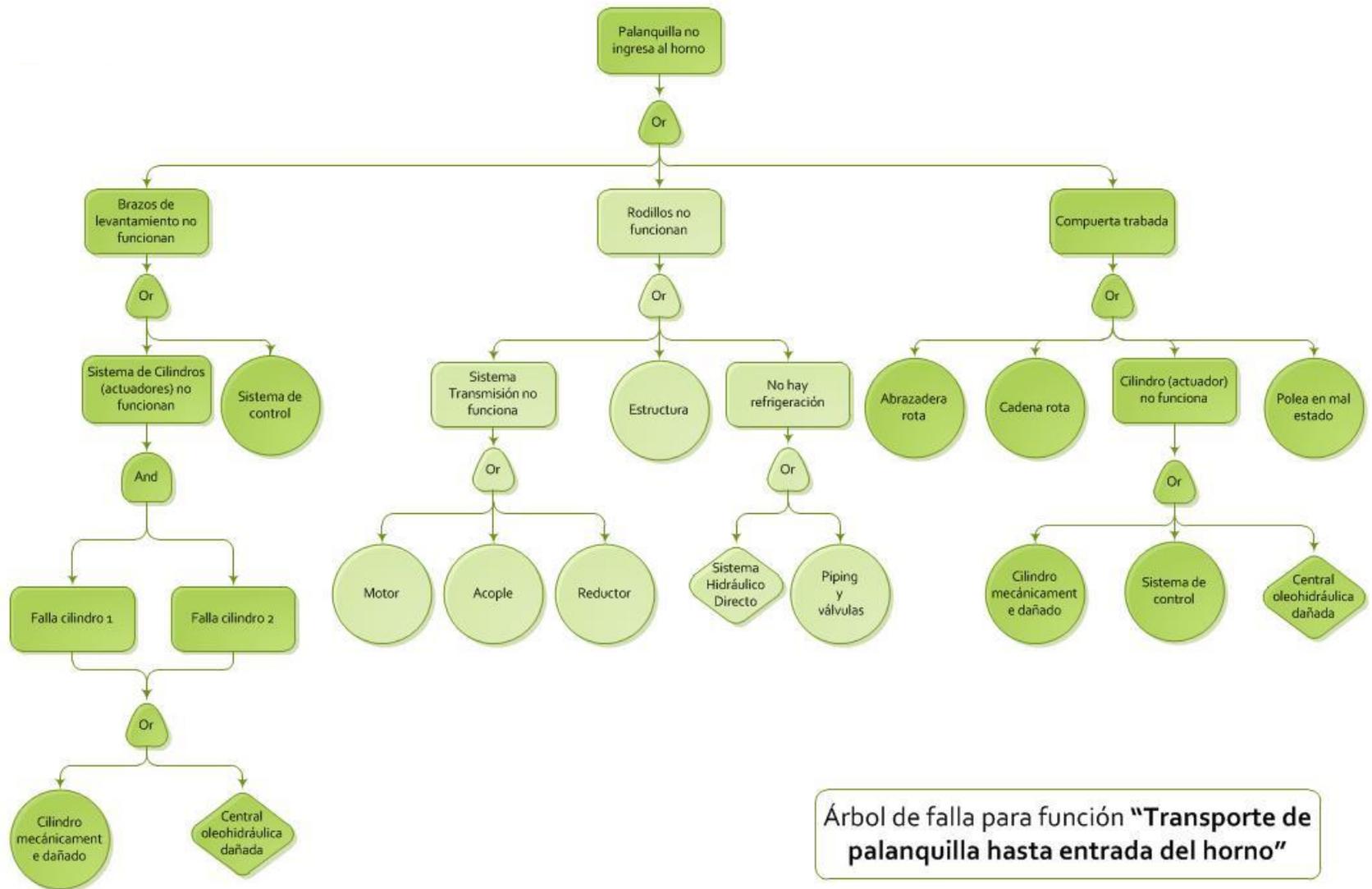
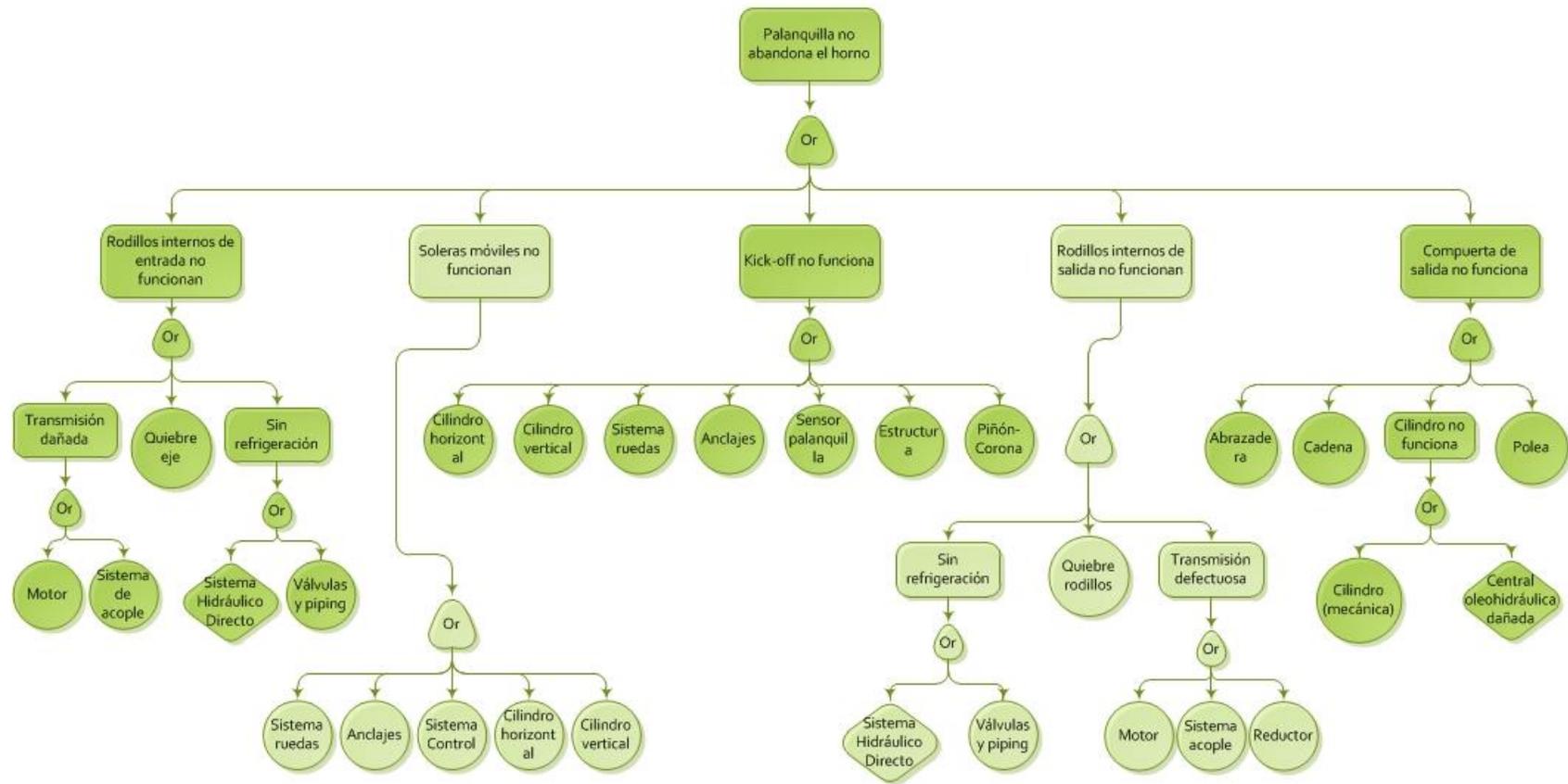


Figura 9: Árbol de falla para función "Palanquilla es depositada en sistema guía de entrada del horno" en zona Horno



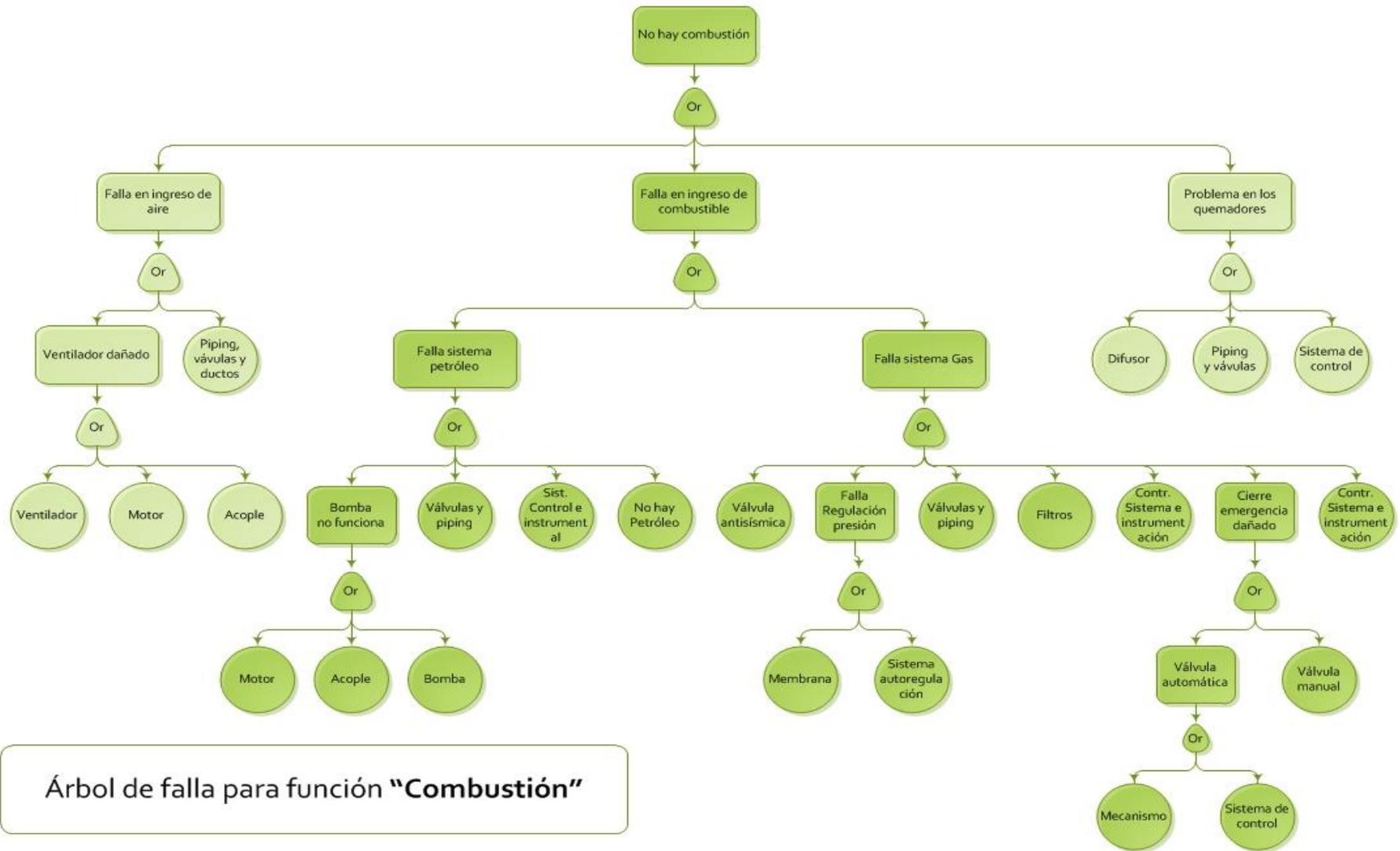
Árbol de falla para función "Transporte de palanquilla hasta entrada del horno"

Figura 10: Árbol de falla para función "Transporte de palanquilla hasta entrada del horno" en zona Hrono



Árbol de falla para función "Transporte de palanquilla al interior del horno"

Figura 11: Árbol de falla para función "Transporte de palanquilla al interior del horno" en zona Horno



Árbol de falla para función "Combustión"

Figura 12: Árbol de falla para función "Combustión" en zona Horno

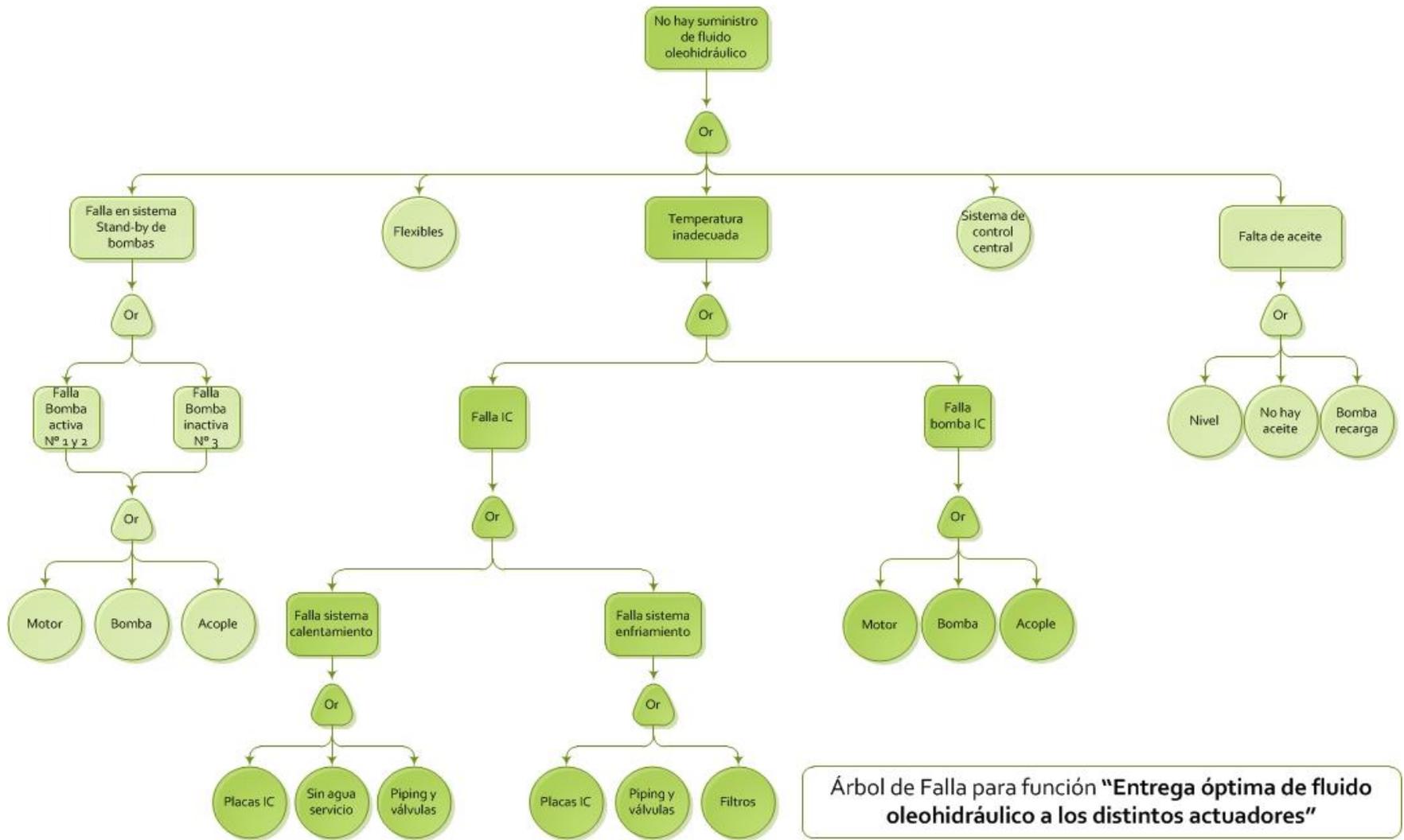


Figura 13: Árbol de falla para función “Entrega óptima de fluido oleo hidráulico a los distintos actuadores” en zona Horno

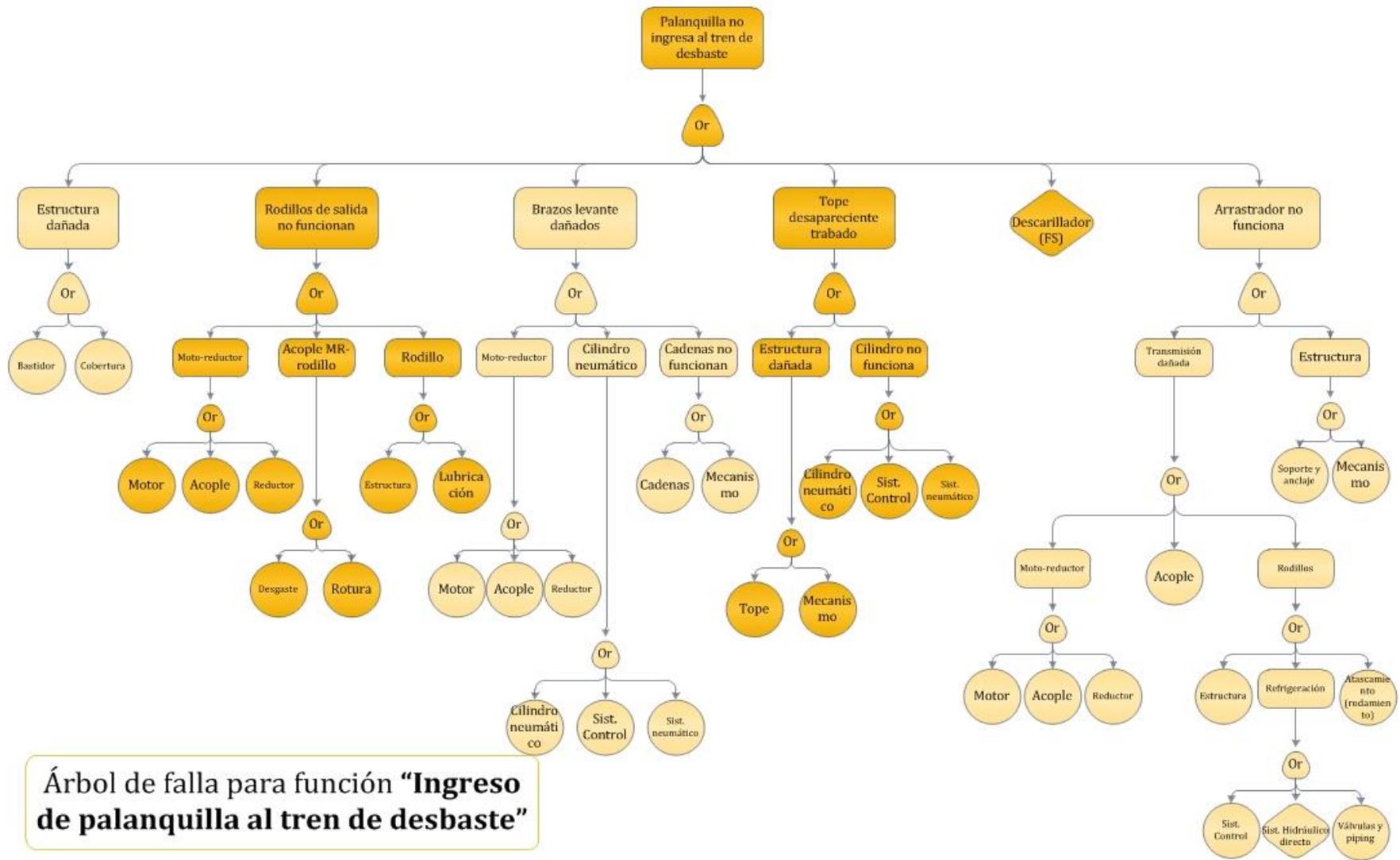


Figura 14: Árbol de falla para función "Ingreso de palanquilla al tren de desbaste" en zona Desbaste y Tren medio

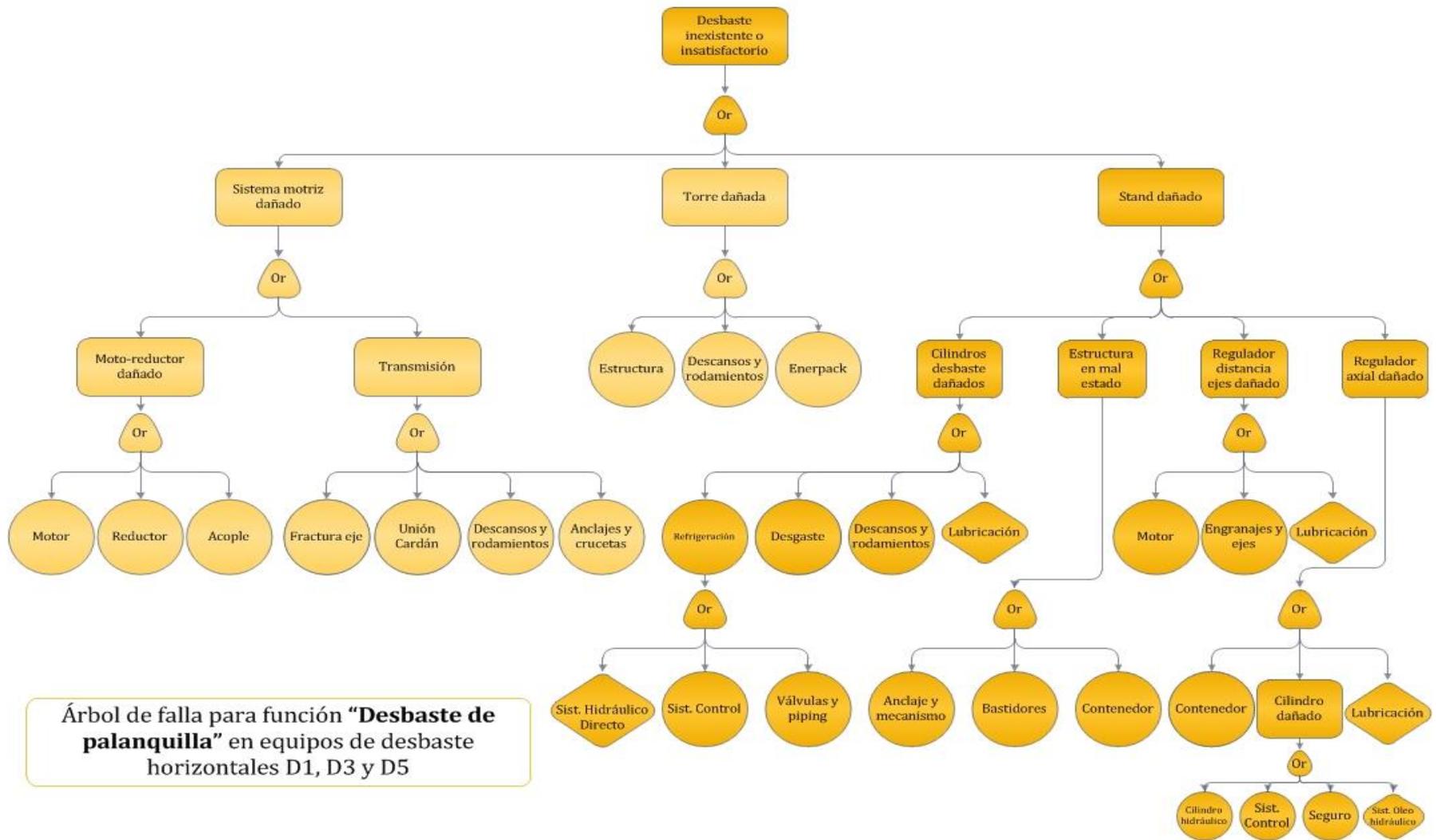


Figura 15: Árbol de falla para función "Desbaste de palanquilla" en equipos de desbaste horizontales D1, D3 y D5 en zona Desbaste y Tren medio

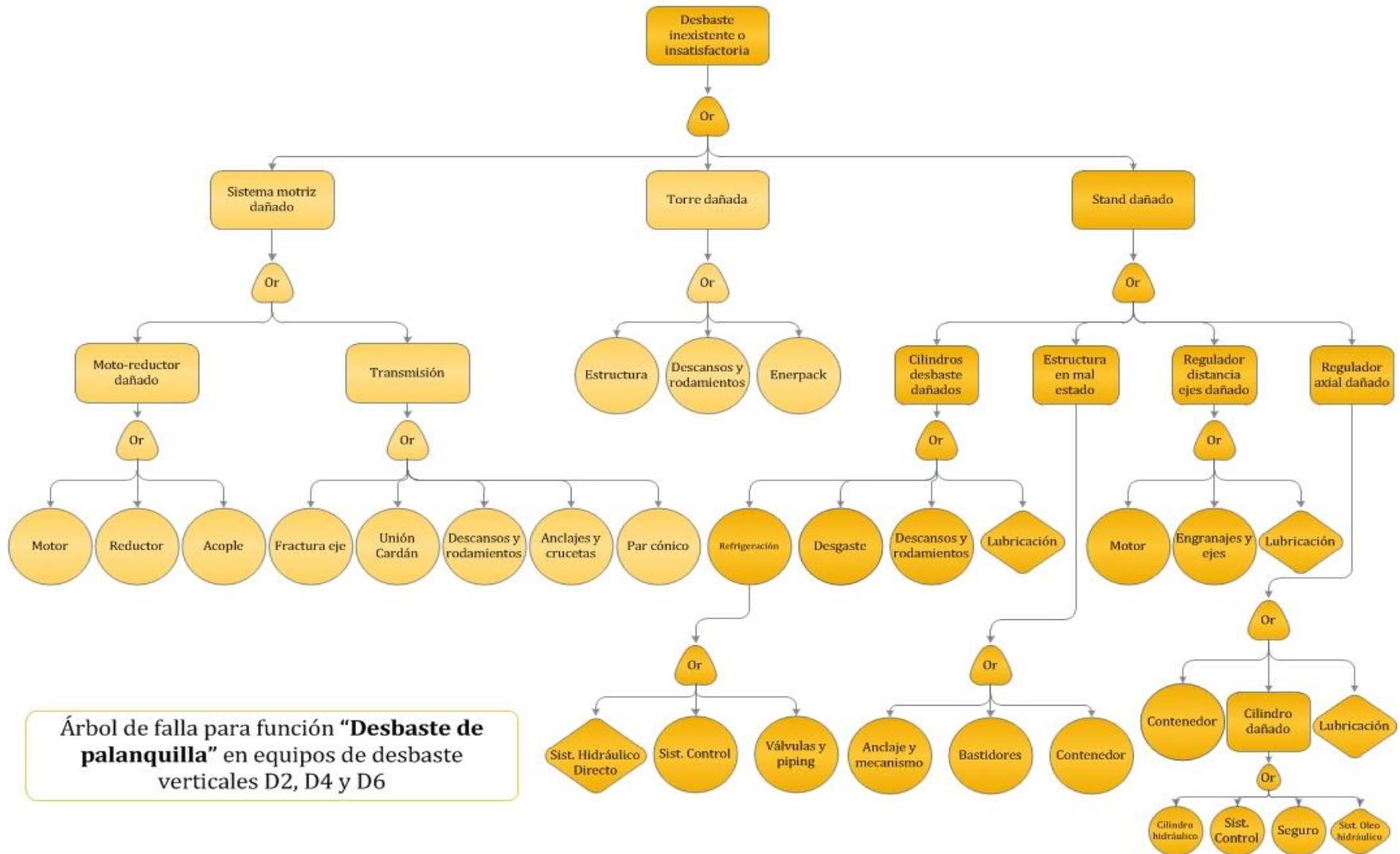


Figura 16: Árbol de falla para función "Desbaste de palanquilla" en equipos de desbaste verticales D2, D4 y D6 en zona Desbaste y Tren medio

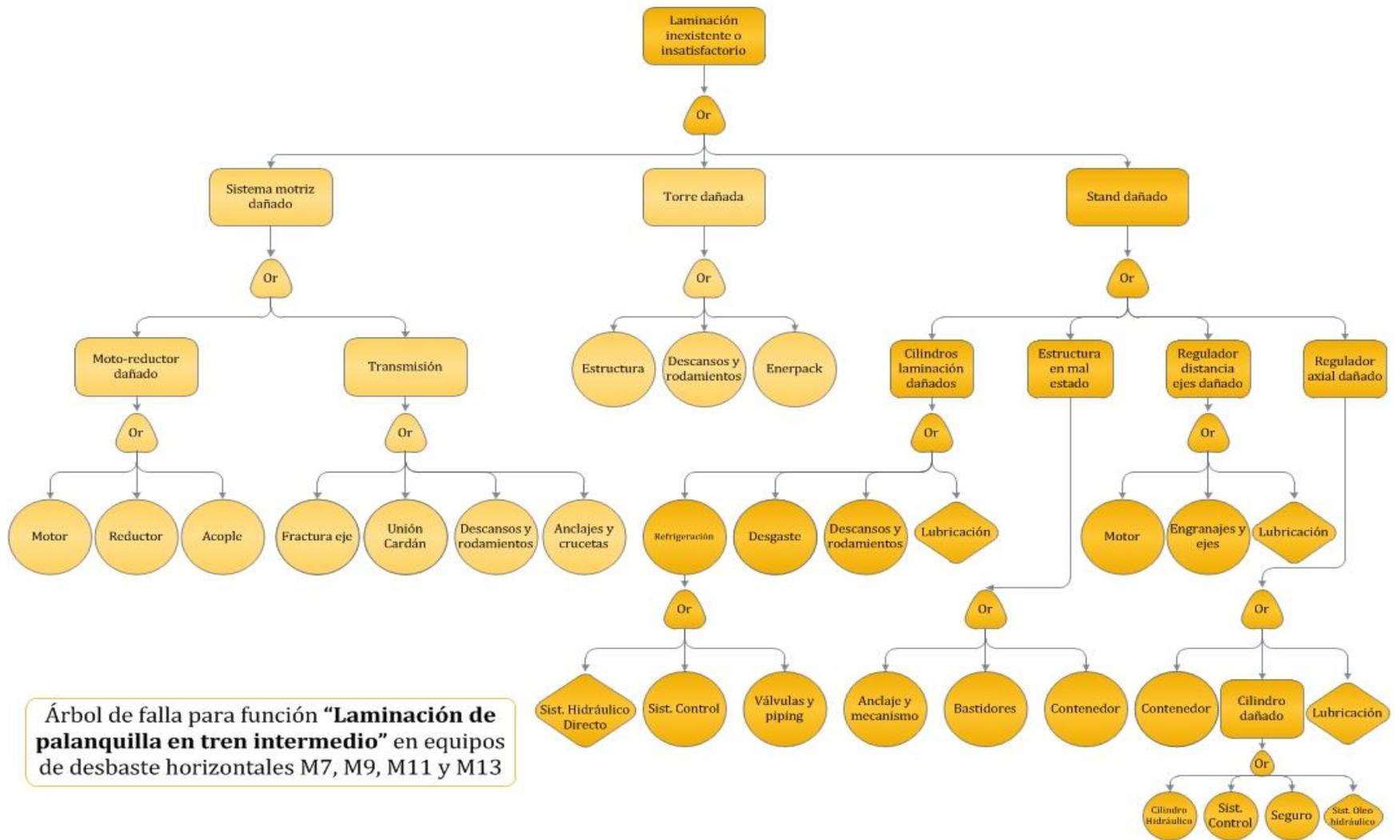


Figura 17: Árbol de falla para función "Laminación de palanquilla en tren intermedio" en equipos de desbaste horizontales M7, M9, M11 y M13 en zona Desbaste y Tren medio

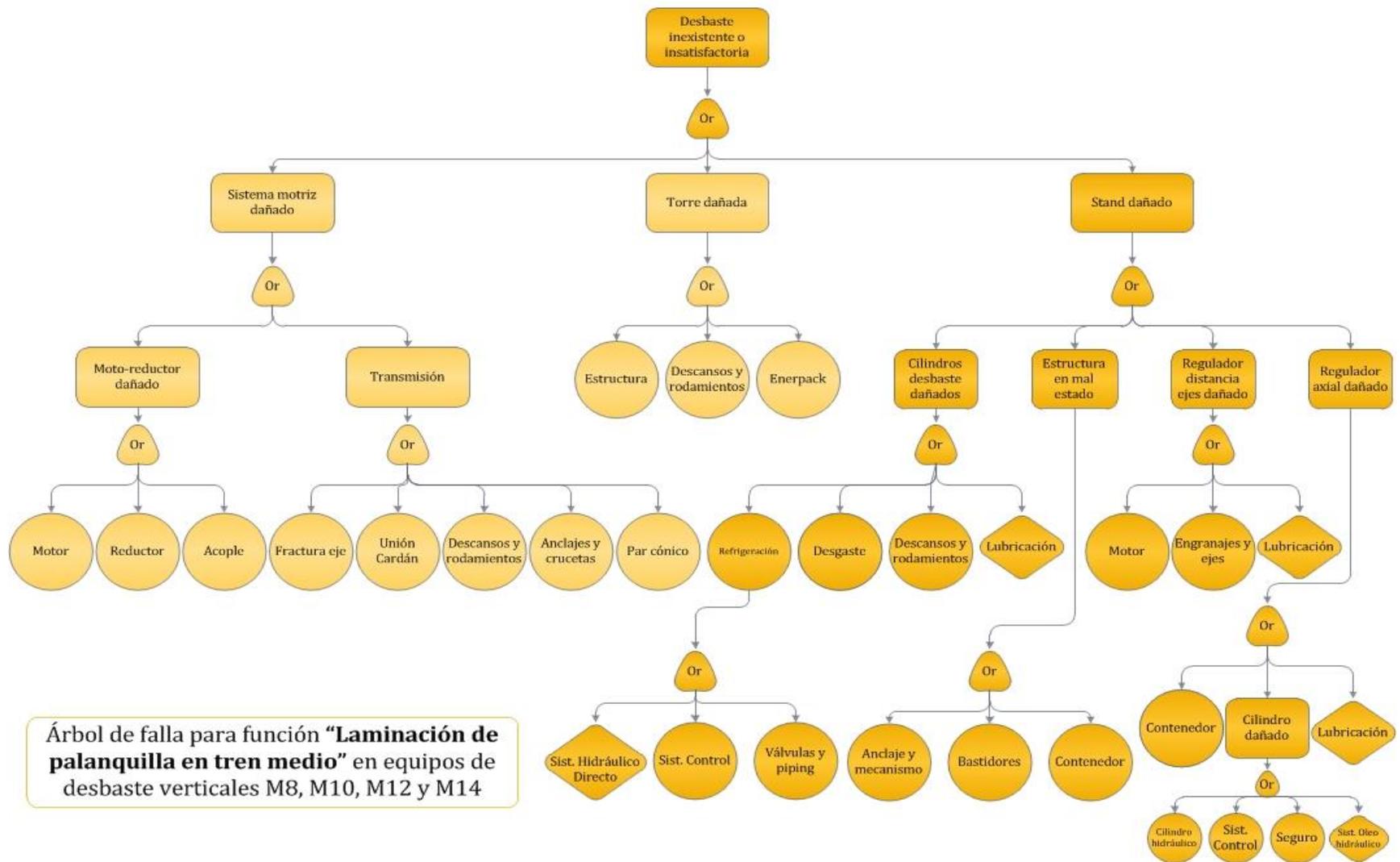
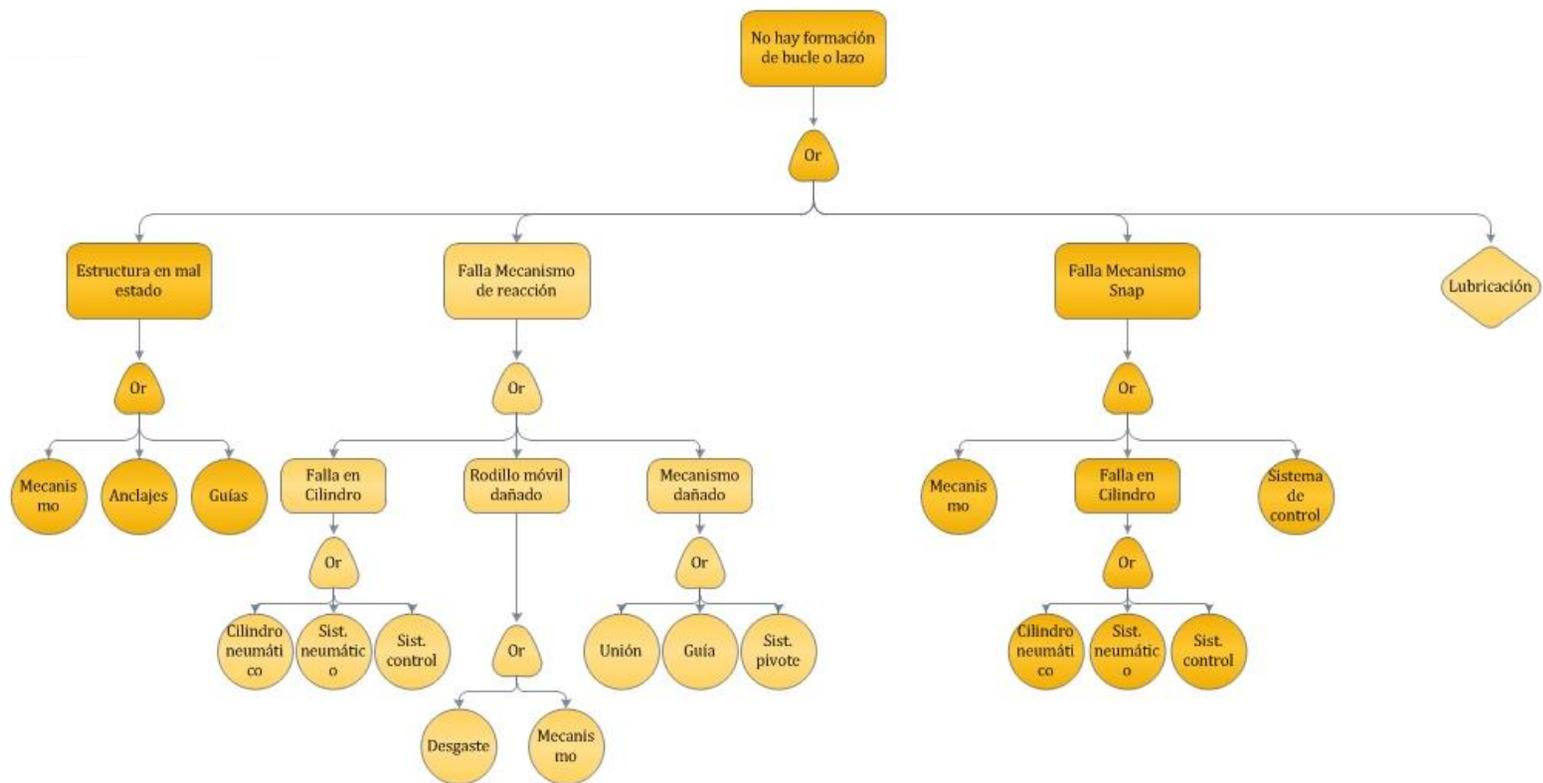
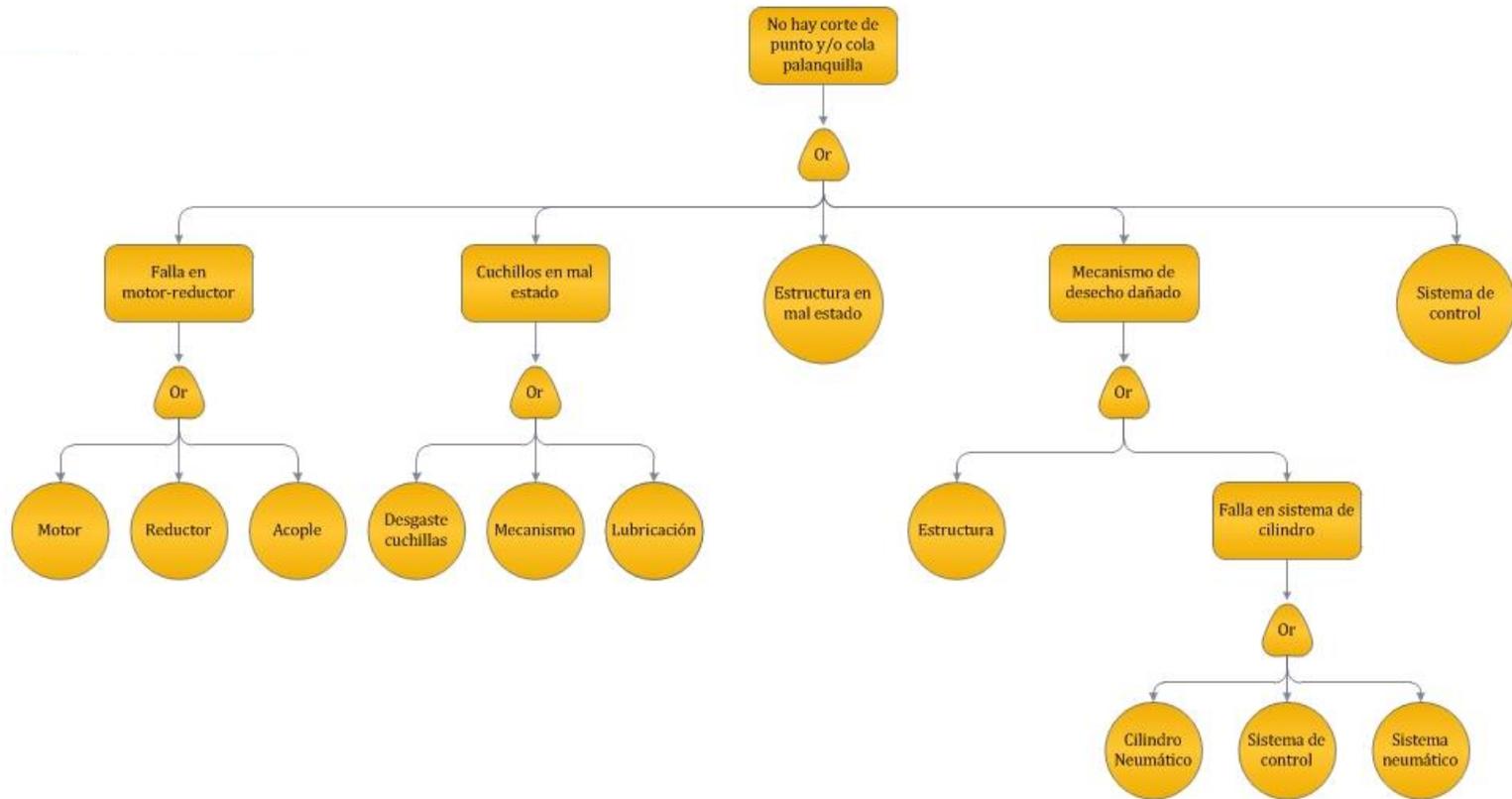


Figura 18: Árbol de falla para función "Laminación de palanquilla en tren medio" en equipos de desbaste verticales M8, M10, M12 y M14 en zona Desbaste y tren Medio



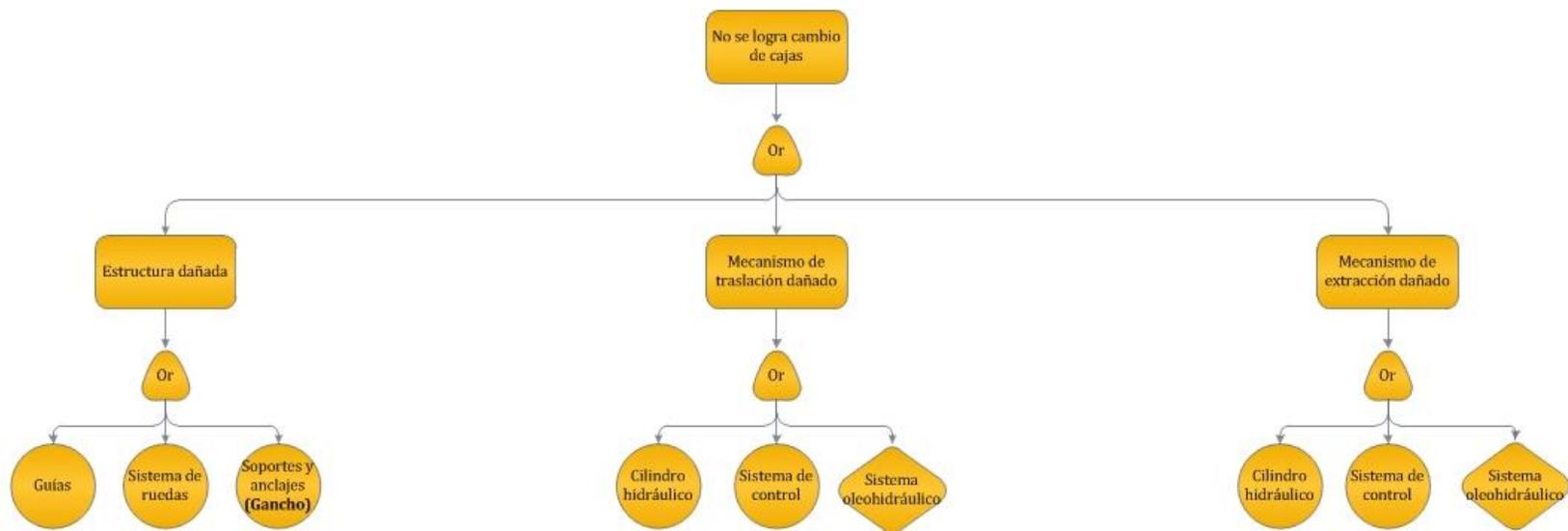
Árbol de falla para función **“Formación de bucle o lazo”**

Figura 19: Árbol de falla para función “Formación de bucle o lazo” en zona Desbaste y Tren medio



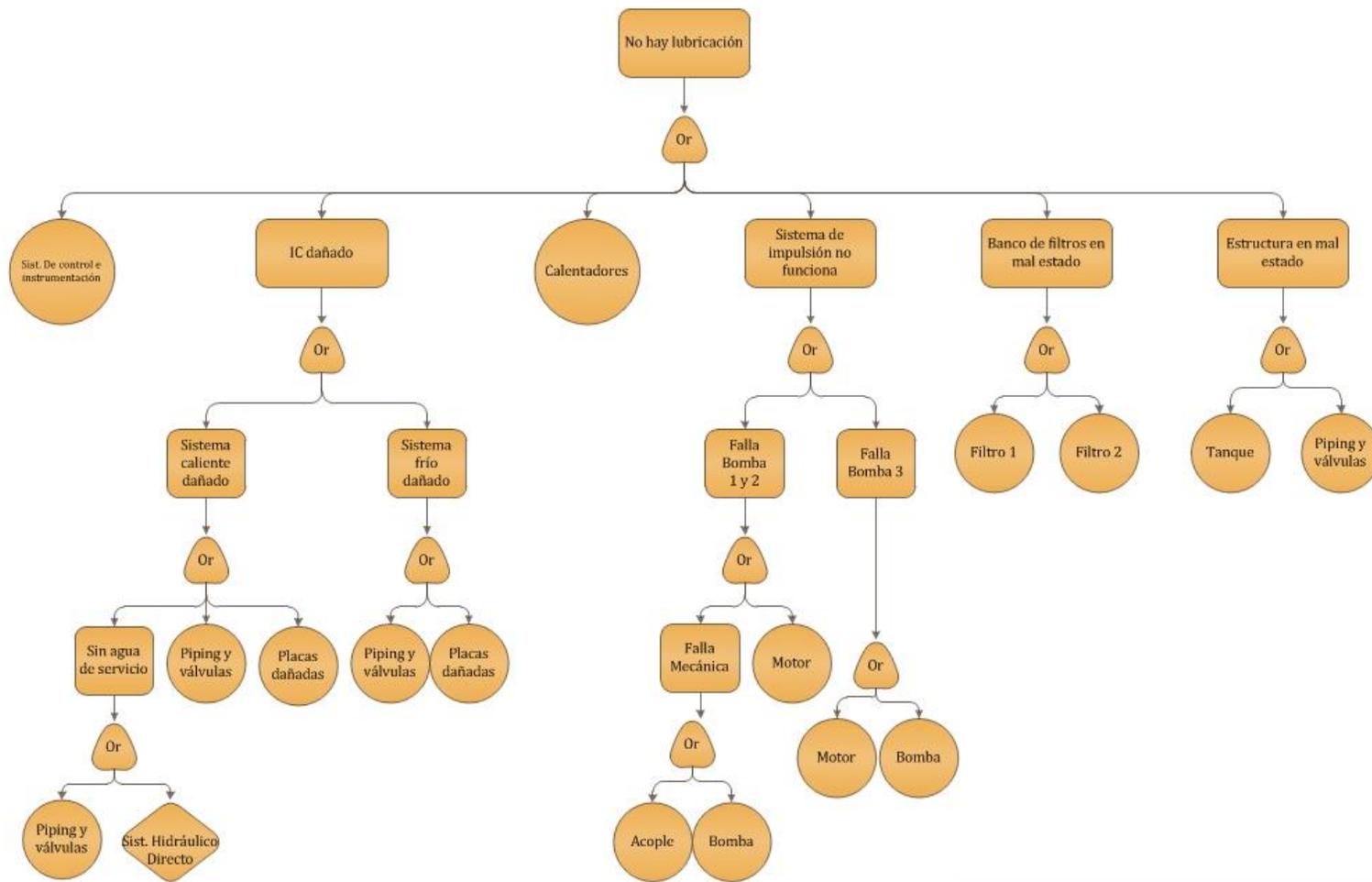
Árbol de falla para función “Corte de punta y cola de palanquilla”

Figura 20: Árbol de falla para función “Corte de punta y cola de palanquilla” en zona Desbaste y Tren medio



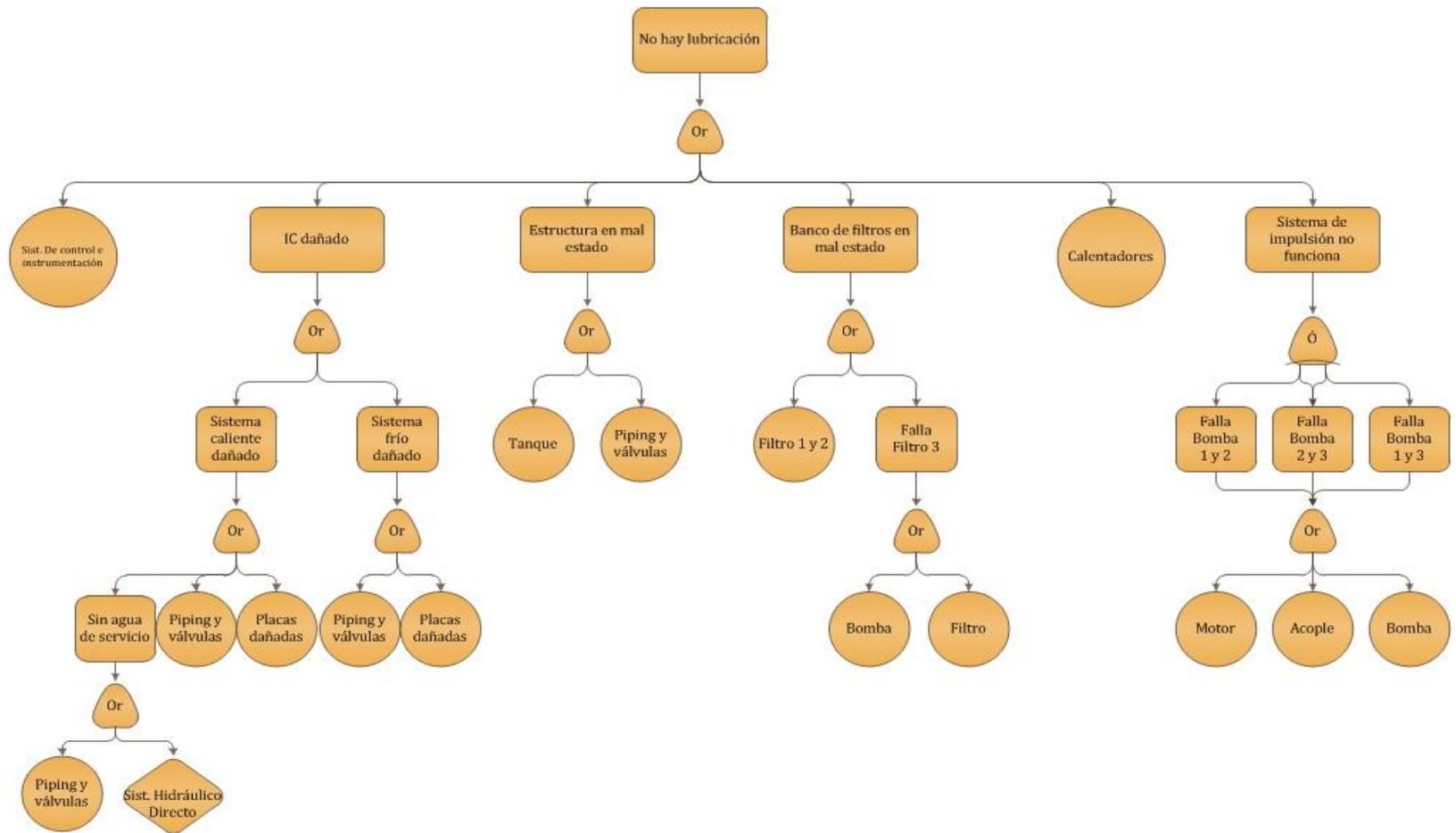
Árbol de falla para función “**Cambio de cajas**”

Figura 21: Árbol de falla para función “Cambio de cajas” en zona Desbaste y Tren medio



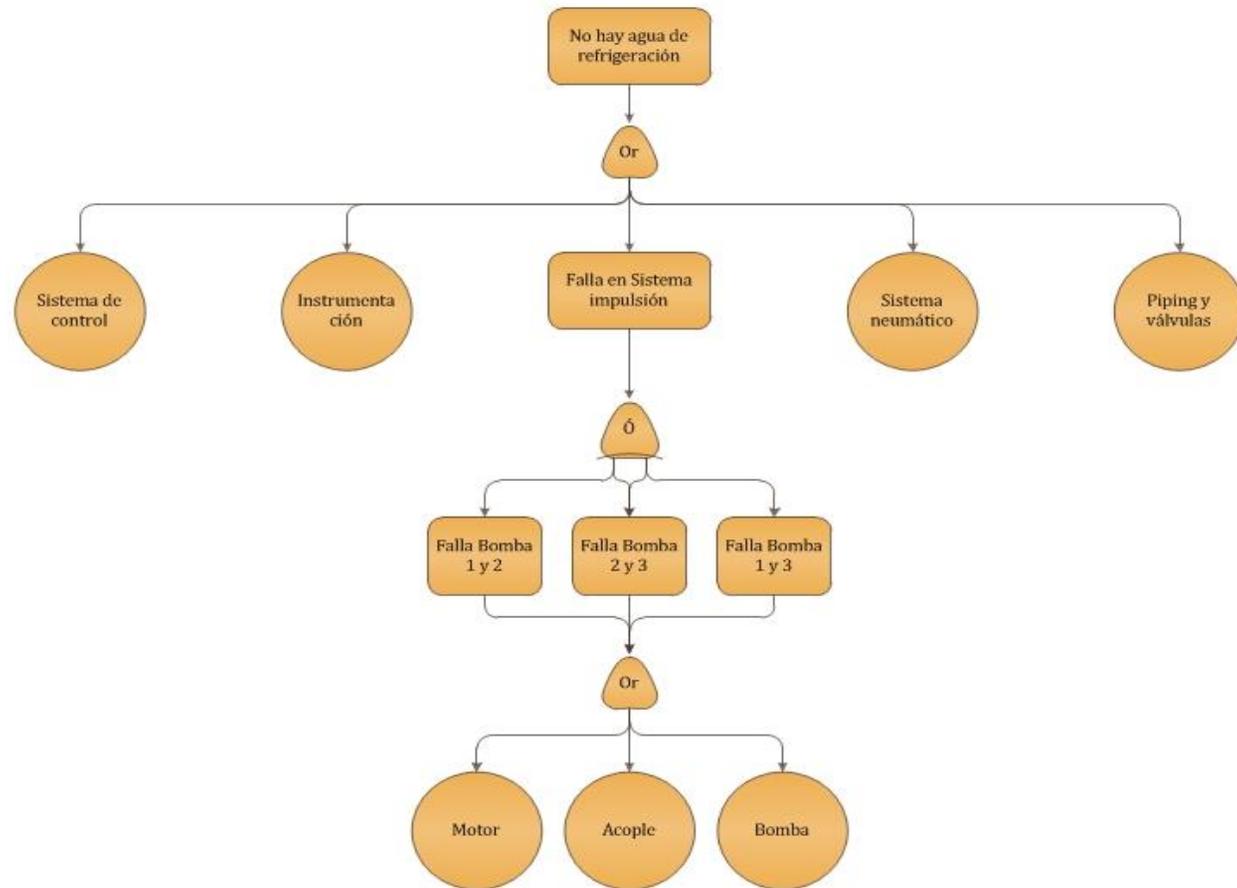
Árbol de falla para función "Lubricación reductores de estación de desbaste D1, D2 y D3"

Figura 22: Árbol de falla para función "Lubricación reductores de estaciones de desbaste D1, D2 y D3" en zona Lubricación laminación



Árbol de falla para función "Lubricación reductores de estación de desbaste D4, D5 y D6 y estaciones de laminación M7 y M8"

Figura 23: Árbol de falla para función "Lubricación reductores de estación de desbaste D4, D5, D6, M7 y M8" en zona Lubricación



Árbol de falla para función “Refrigeración estaciones M13 y M14 de laminación”

Figura 24: Árbol de falla para función “Refrigeración estaciones M13 y M14 de laminación en zona Lubricación”

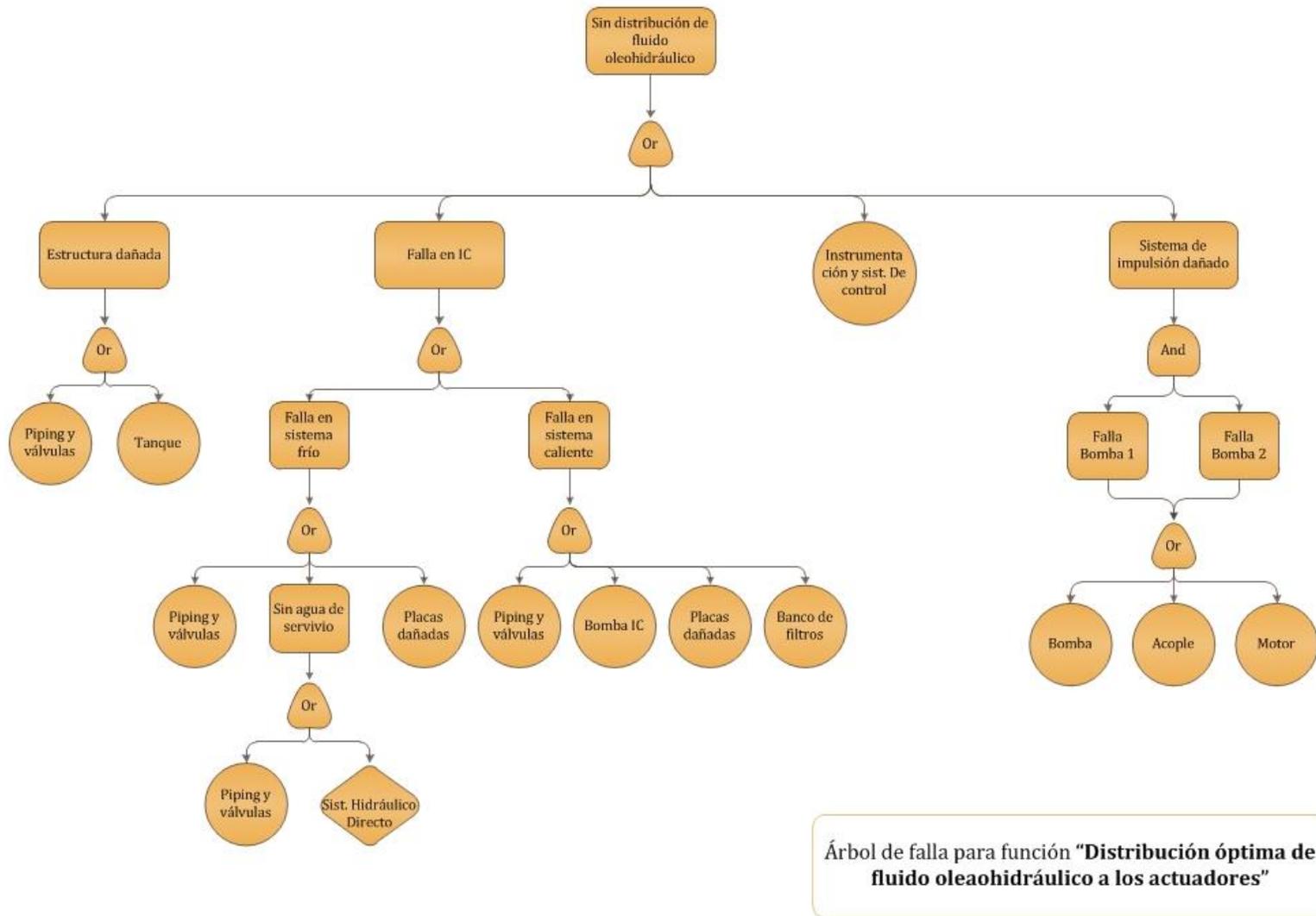
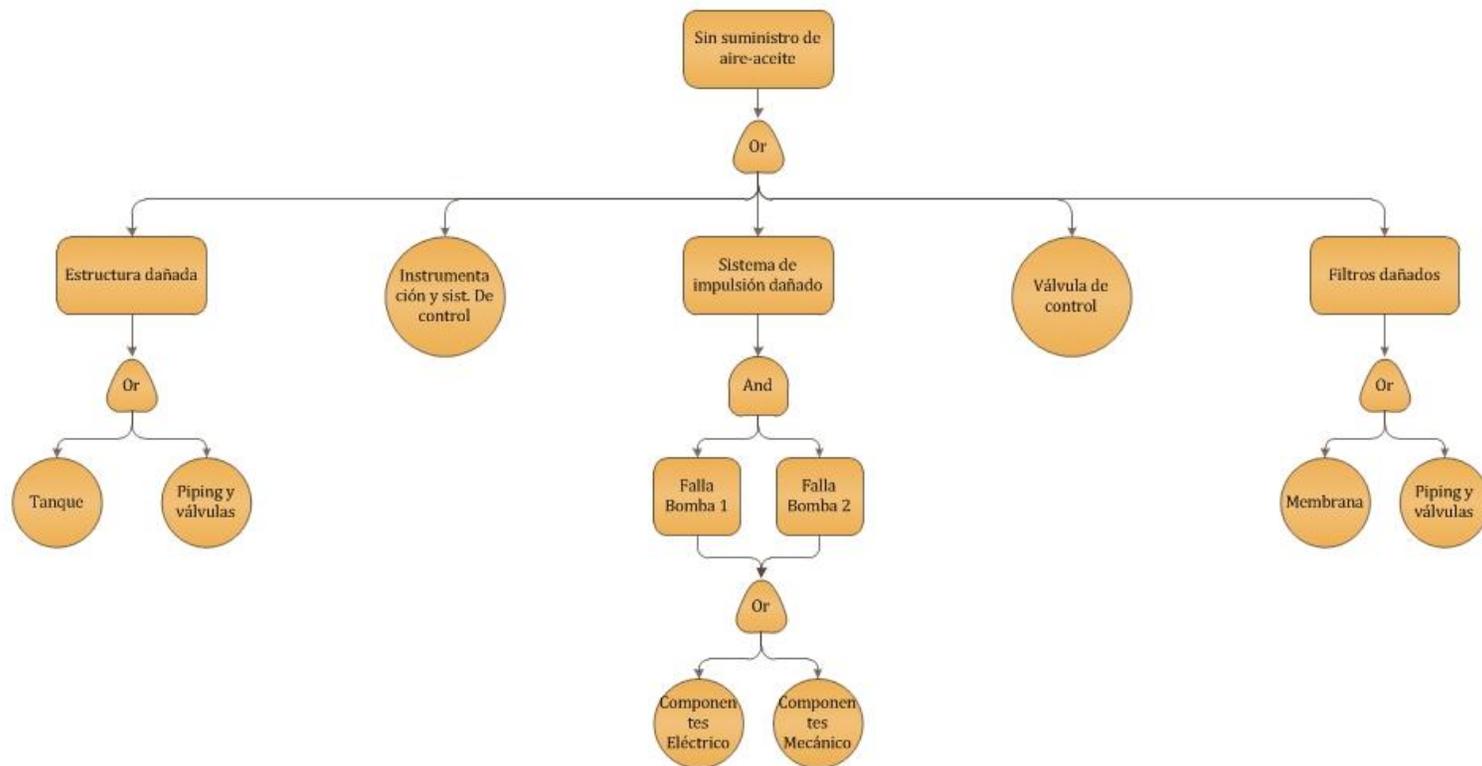
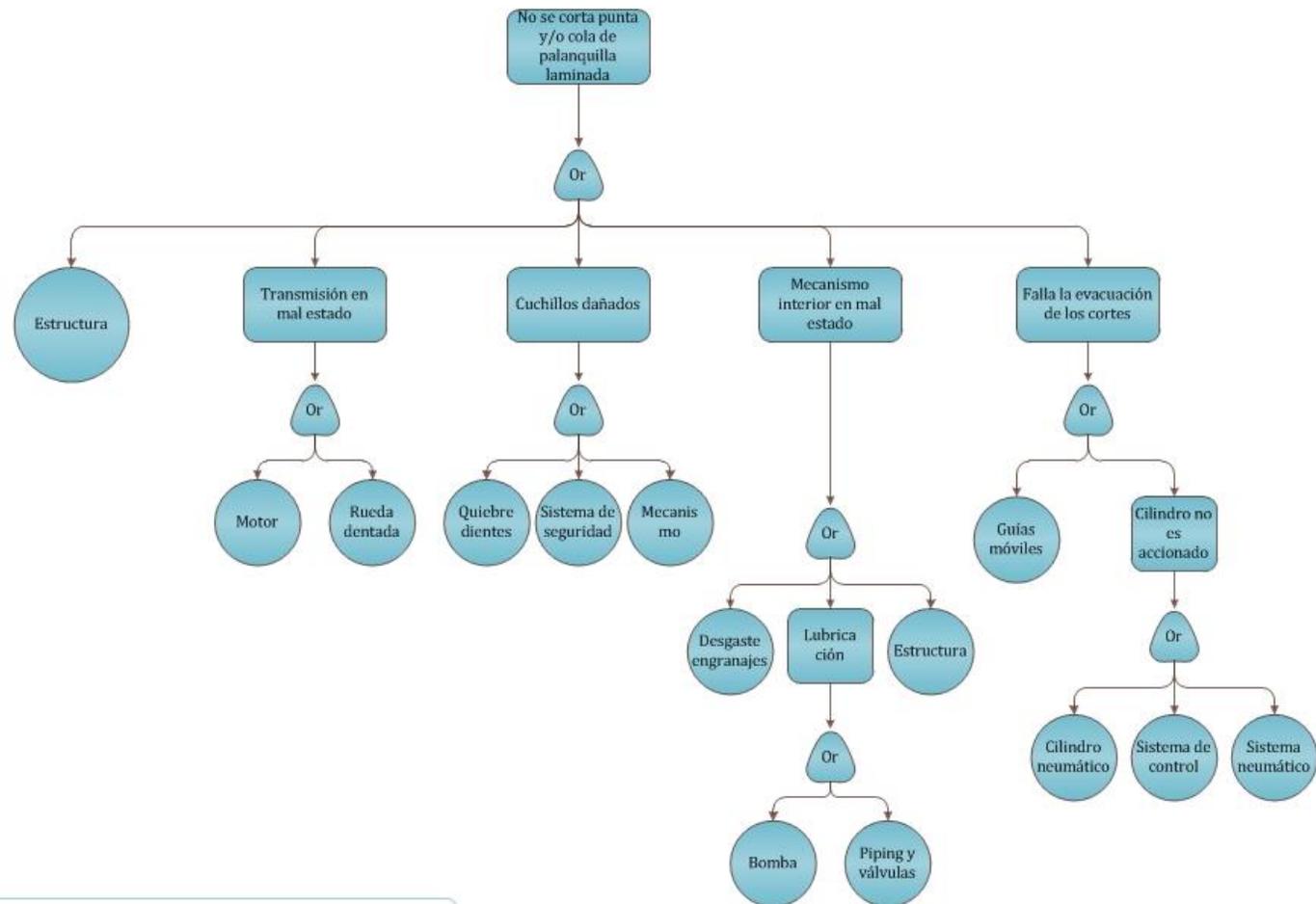


Figura 25: Árbol de falla para función “Distribución óptima de fluido oleo hidráulico a los actuadores” en zona Lubricación



Árbol de falla para función “Distribución óptima de lubricación aire-aceite”

Figura 26: Árbol de falla para función “Distribución óptima de lubricación aire-aceite” en zona Lubricación



Árbol de falla para función **“Corte de punta y cola de producto entrante al monoblock (Cizalla 2)”**

Figura 27: Árbol de falla para función **“Corte de punta y cola de producto entrante al monoblock (Cizalla 2)”** en zona Monoblock.

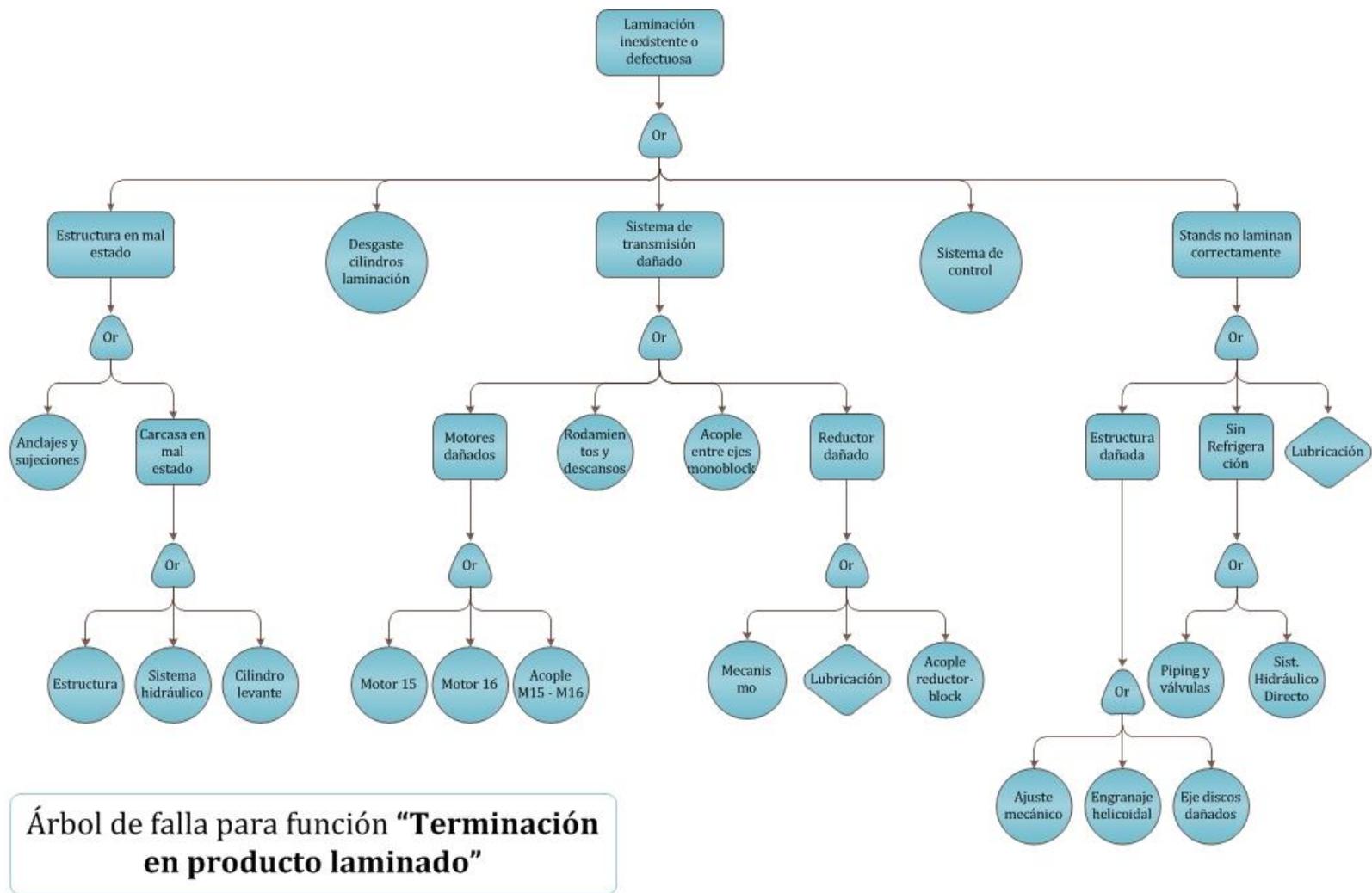
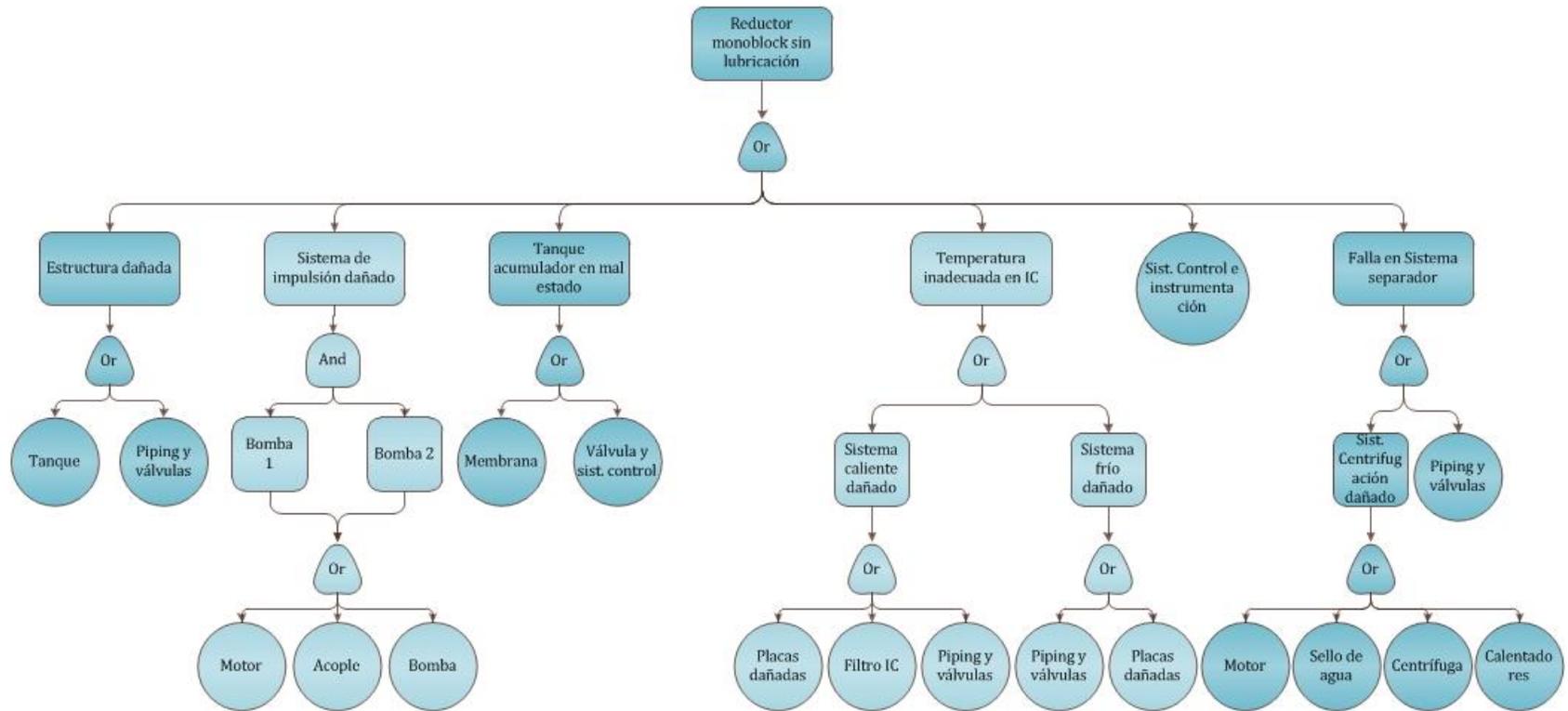


Figura 28: Árbol de falla para función "Terminación en producto laminado" en zona Monoblock



Árbol de falla para función **“Lubricación reductor monoblock”**

Figura 29: Árbol de falla para función “Lubricación de reductor de monoblock” en zona Monoblock

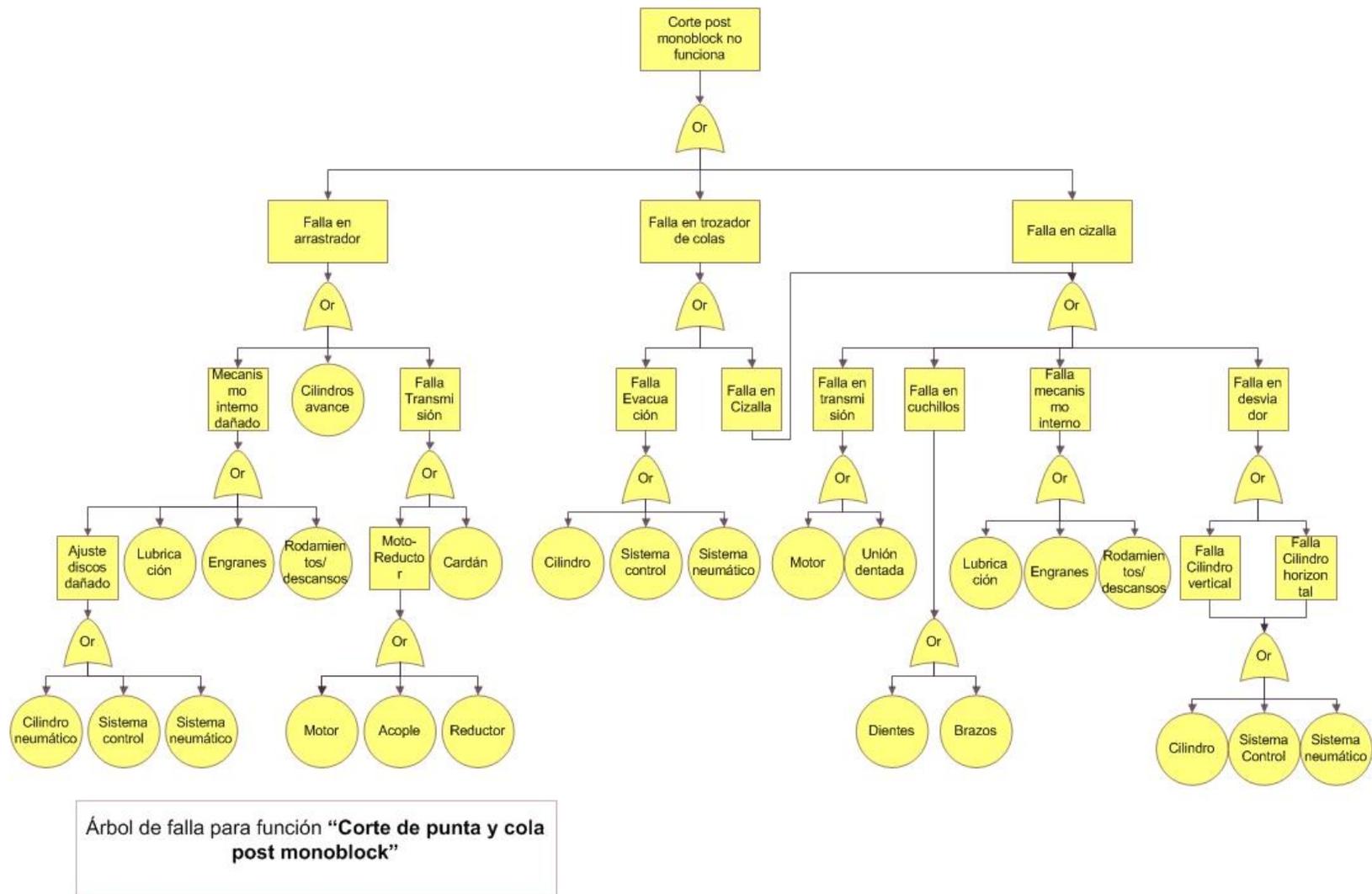


Figura 30: Árbol de falla para función “Corte de punta y cola post monoblock” en zona Barras

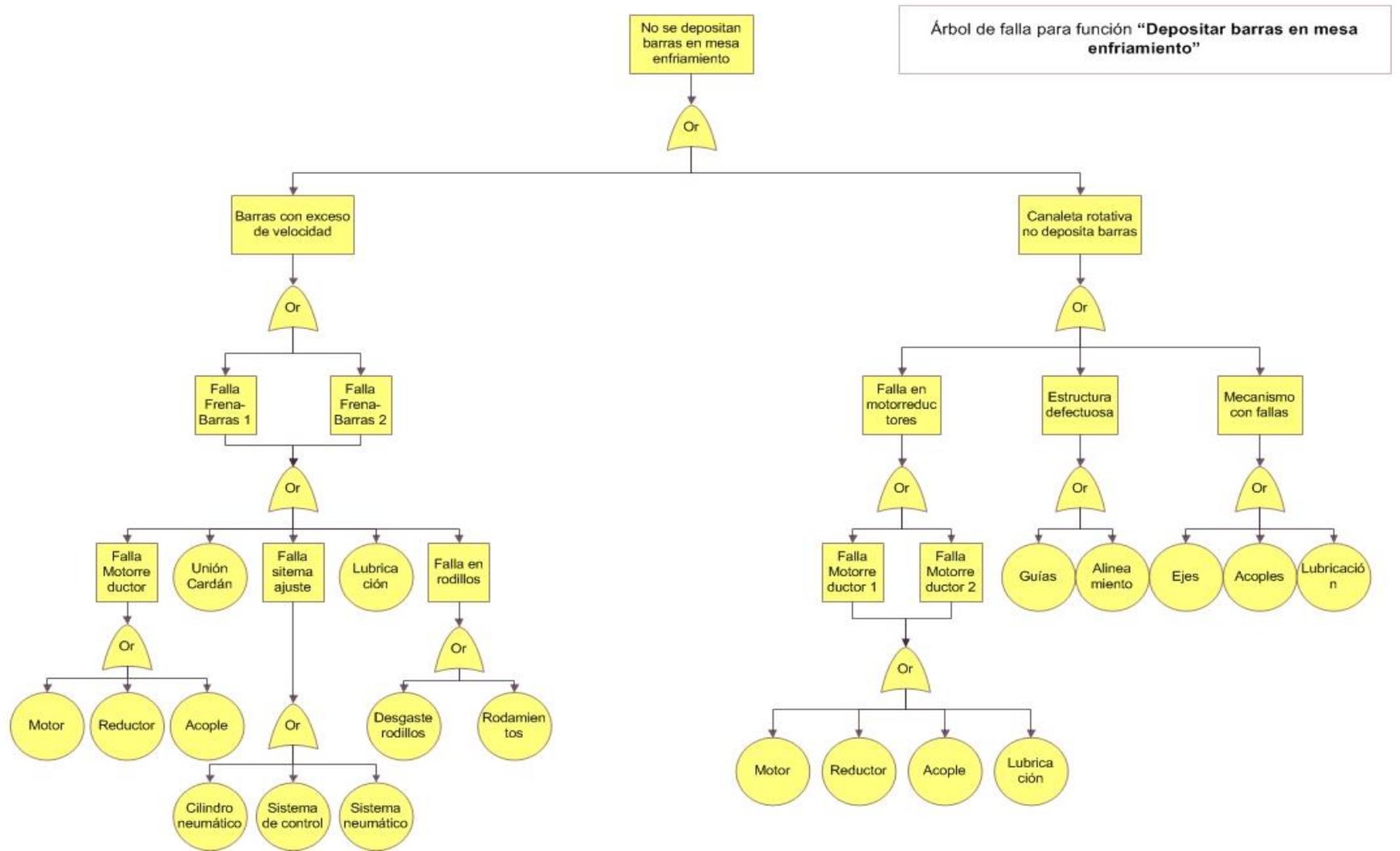
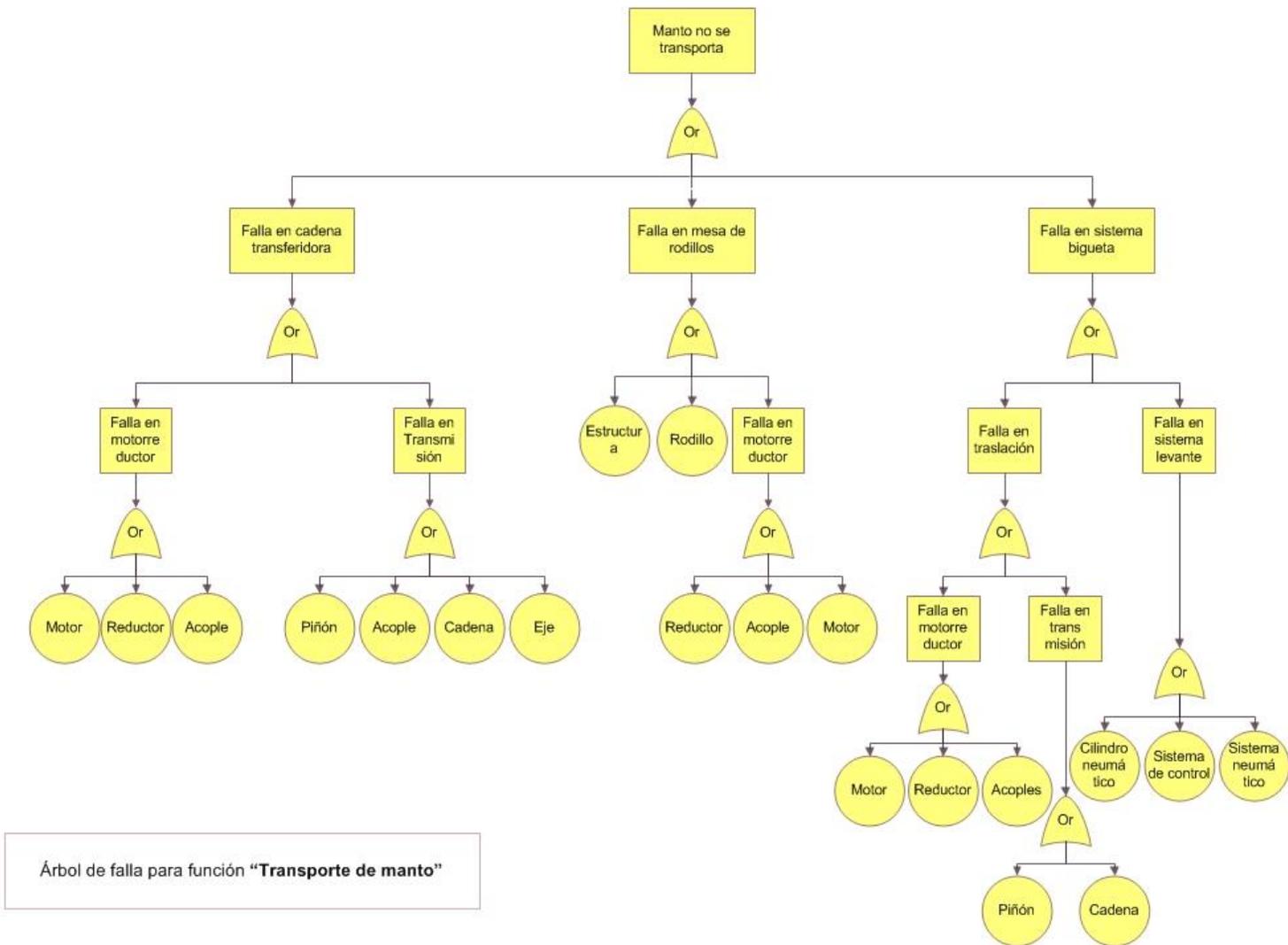
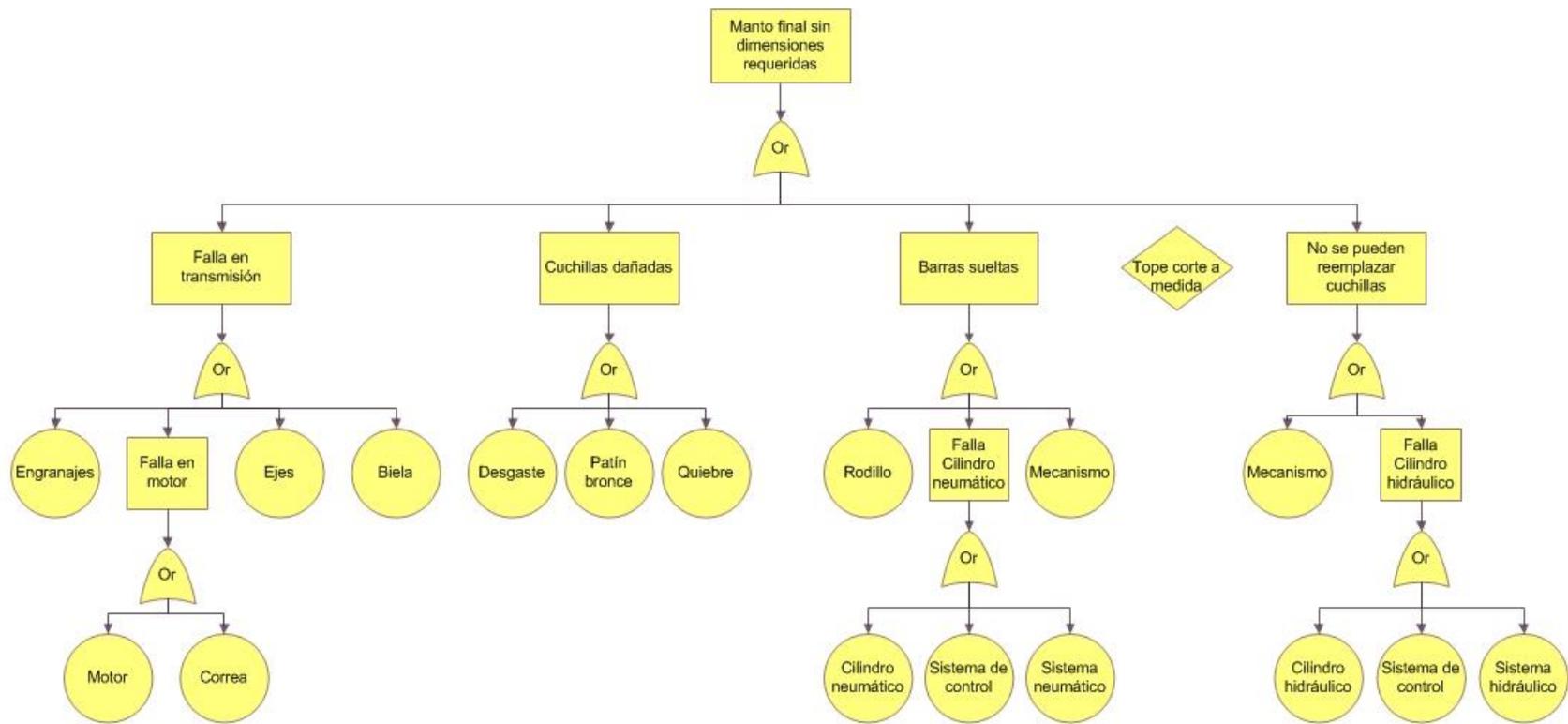


Figura 31: Árbol de falla para función "Depositar barras en mesa de enfriamiento" en zona Barras



Árbol de falla para función "Transporte de manto"

Figura 32: Árbol de falla para función "Transporte de manto" en zona Barras



Árbol de falla para función **“Corte a la medida del manto”**

Figura 33: Árbol de falla para función “Corte a la medida del manto” en zona Barras.

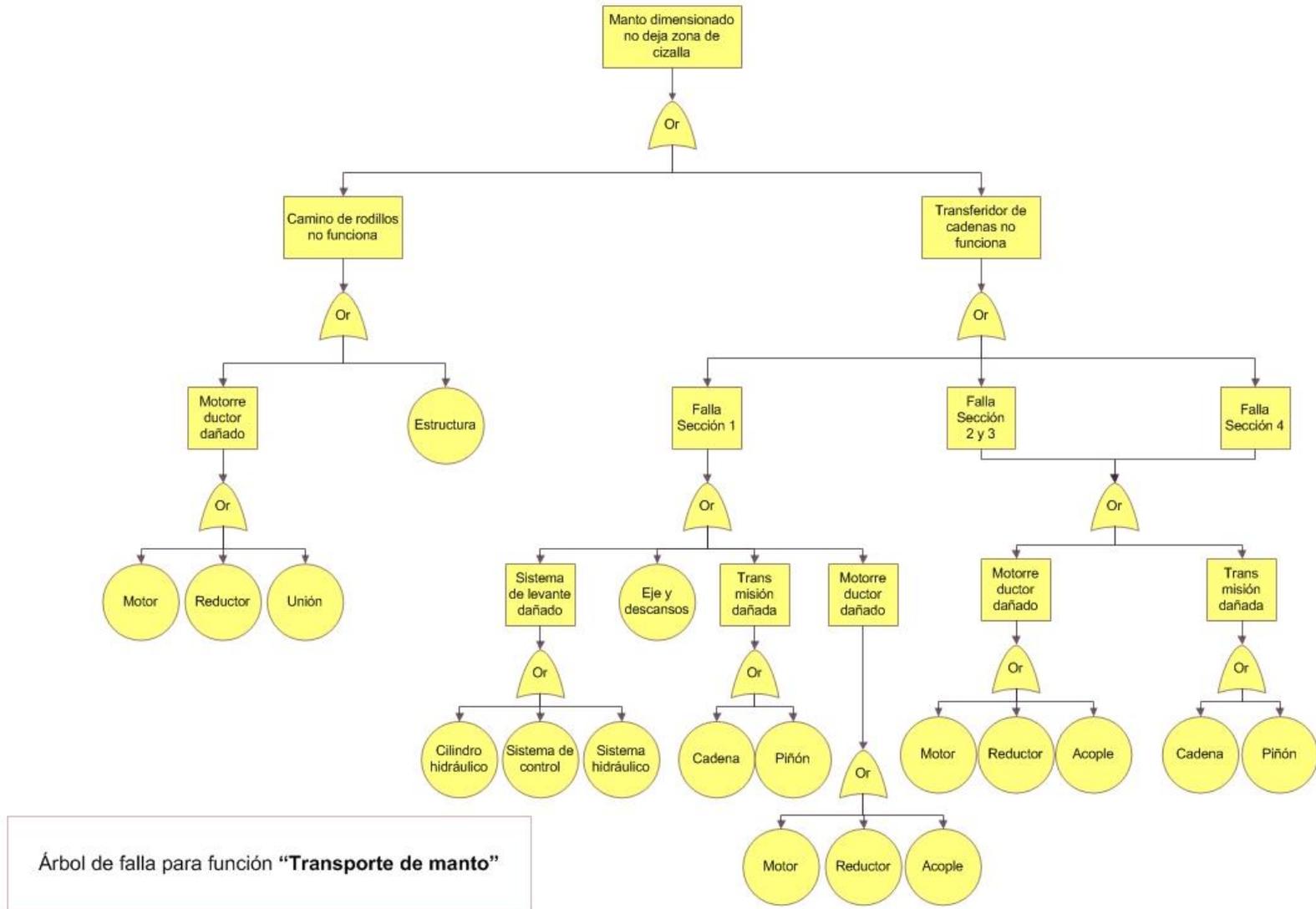
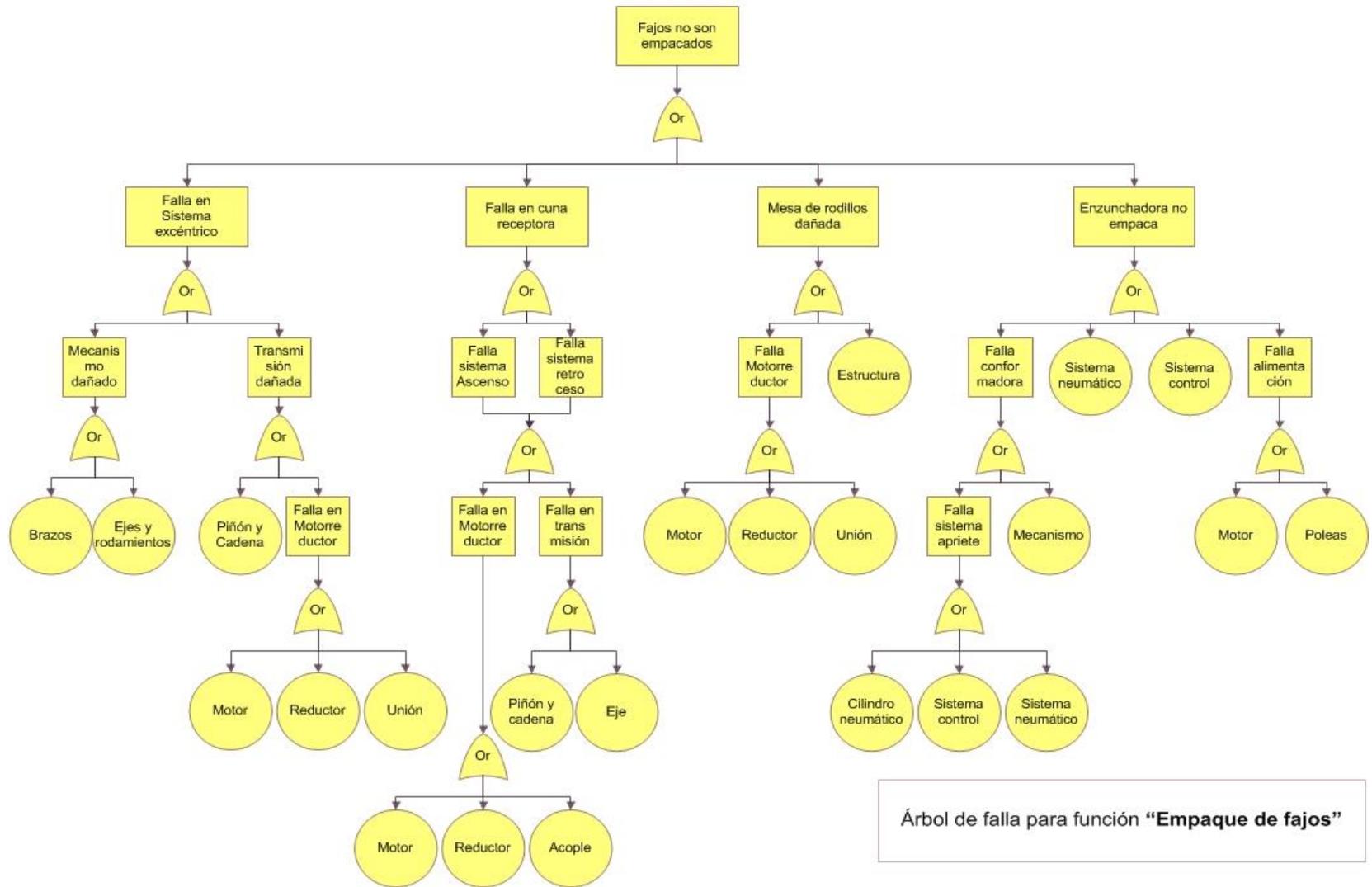
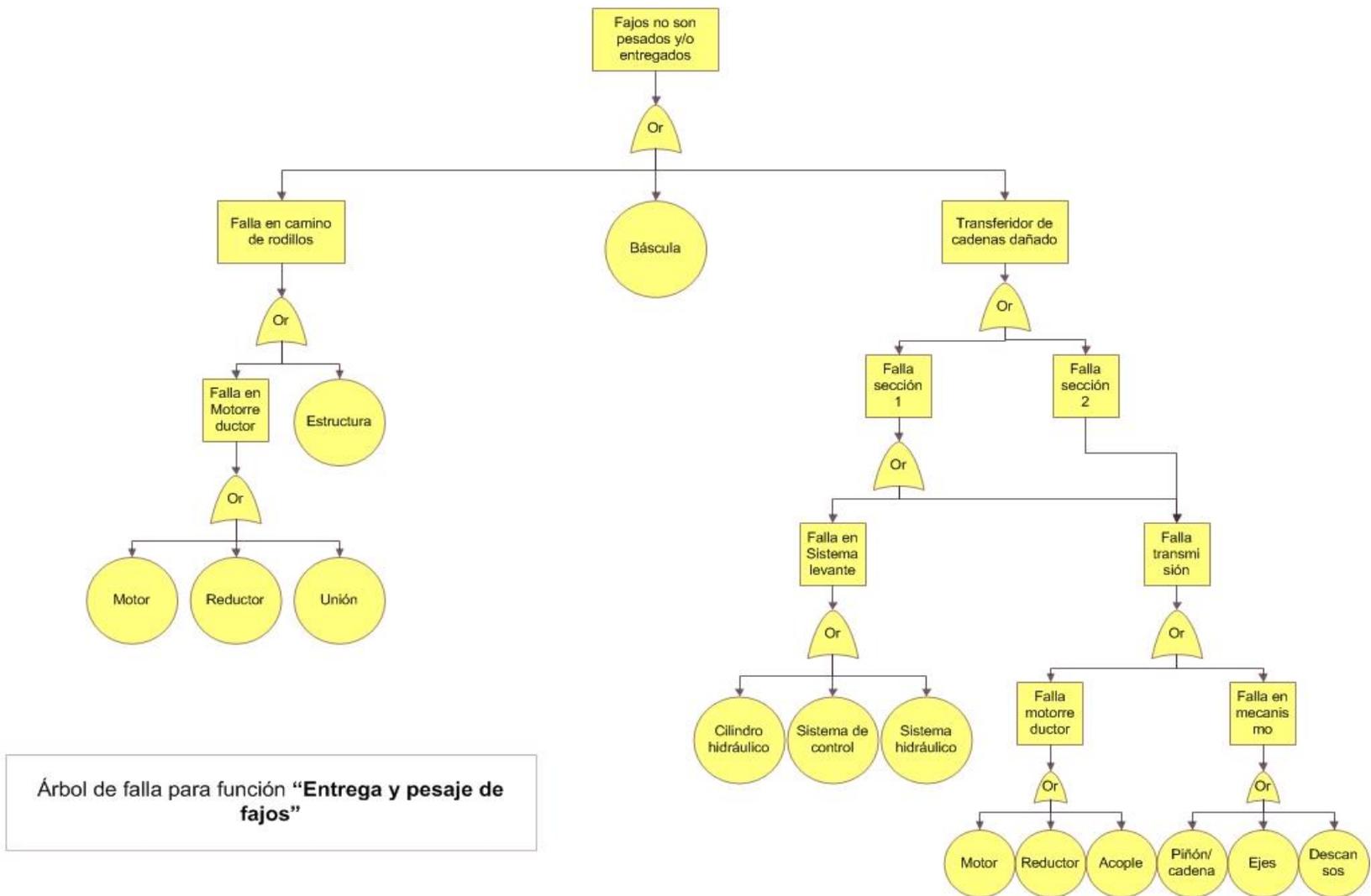


Figura 34: Árbol de falla para función "Transporte de manto" en zona Barras



Árbol de falla para función "Empaque de fajos"

Figura 35: Árbol de falla para función "Empaque de fajos"



Árbol de falla para función “Entrega y pesaje de fajos”

Figura 36: Árbol de falla para función “Entrega y pesaje de fajos” en zona Barras

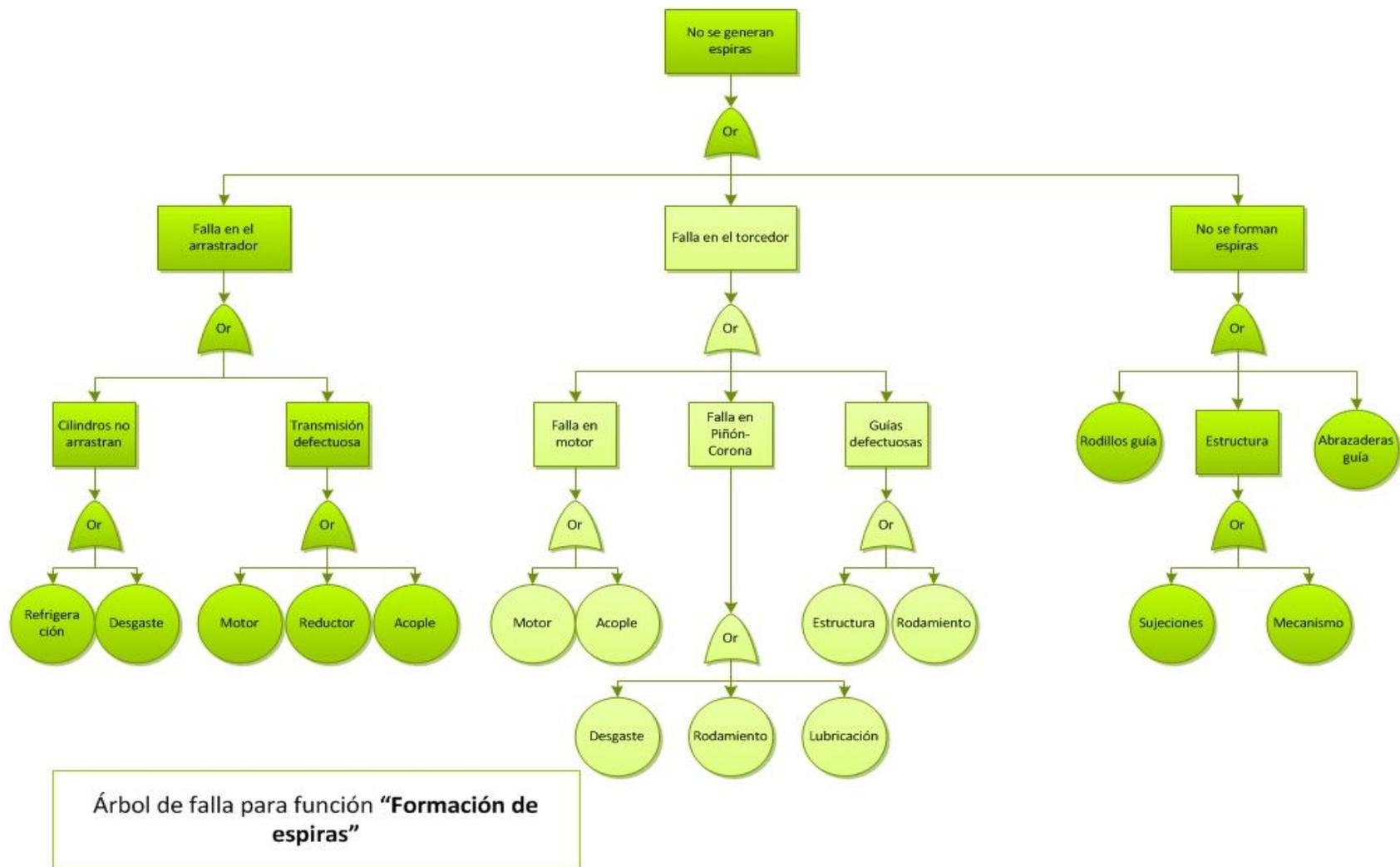
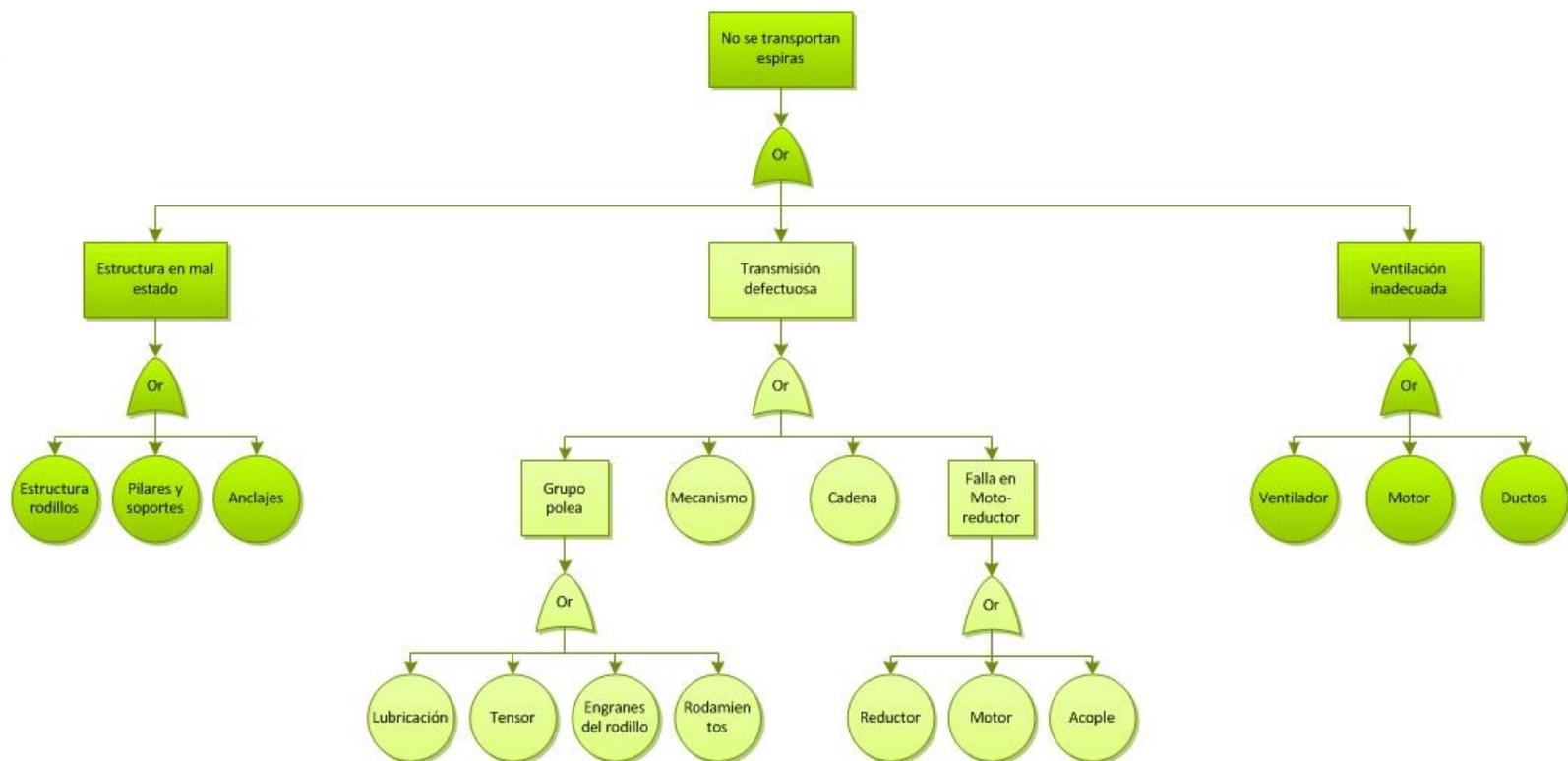
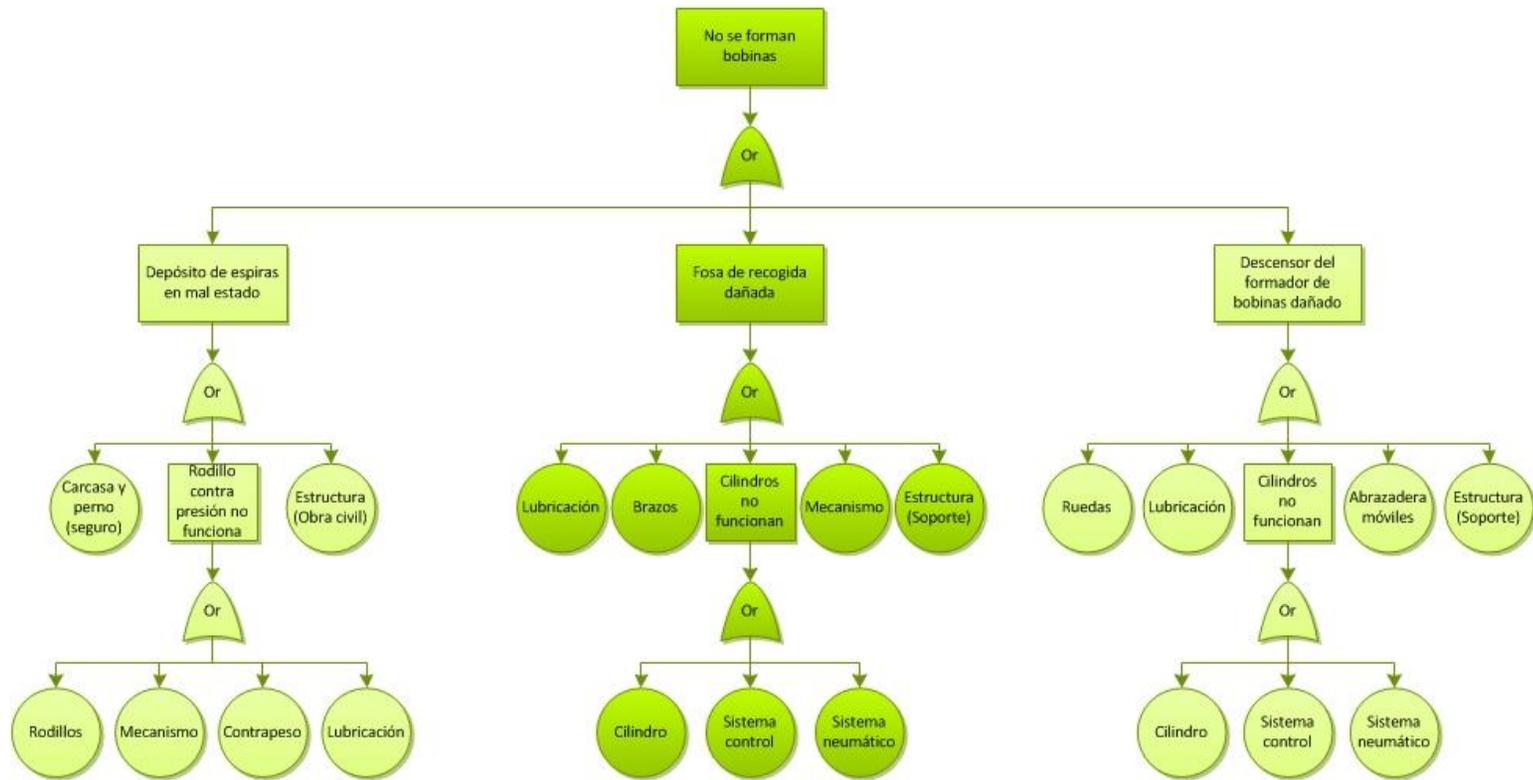


Figura 37: Árbol de falla para función "Formación de espiras" en zona Rollos



Árbol de falla para función “Transporte de espiras con temperatura controlada”

Figura 38: Árbol de falla para función “Transporte de espiras con temperatura controlada” en zona Rollos



Árbol de falla para función **“Formar bobinas”**

Figura 39: Árbol de falla para función “Formar bobinas” en zona Rollos

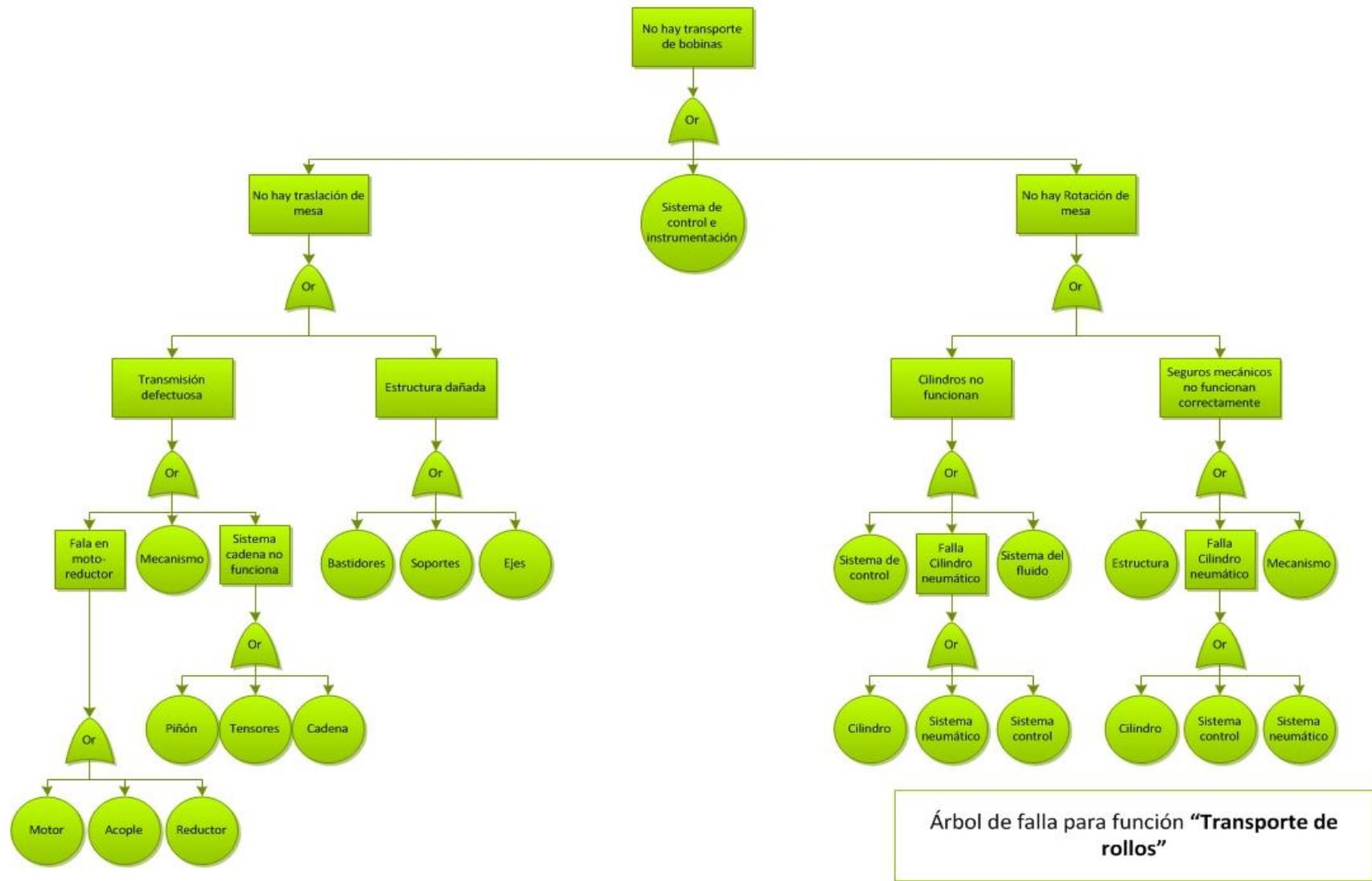
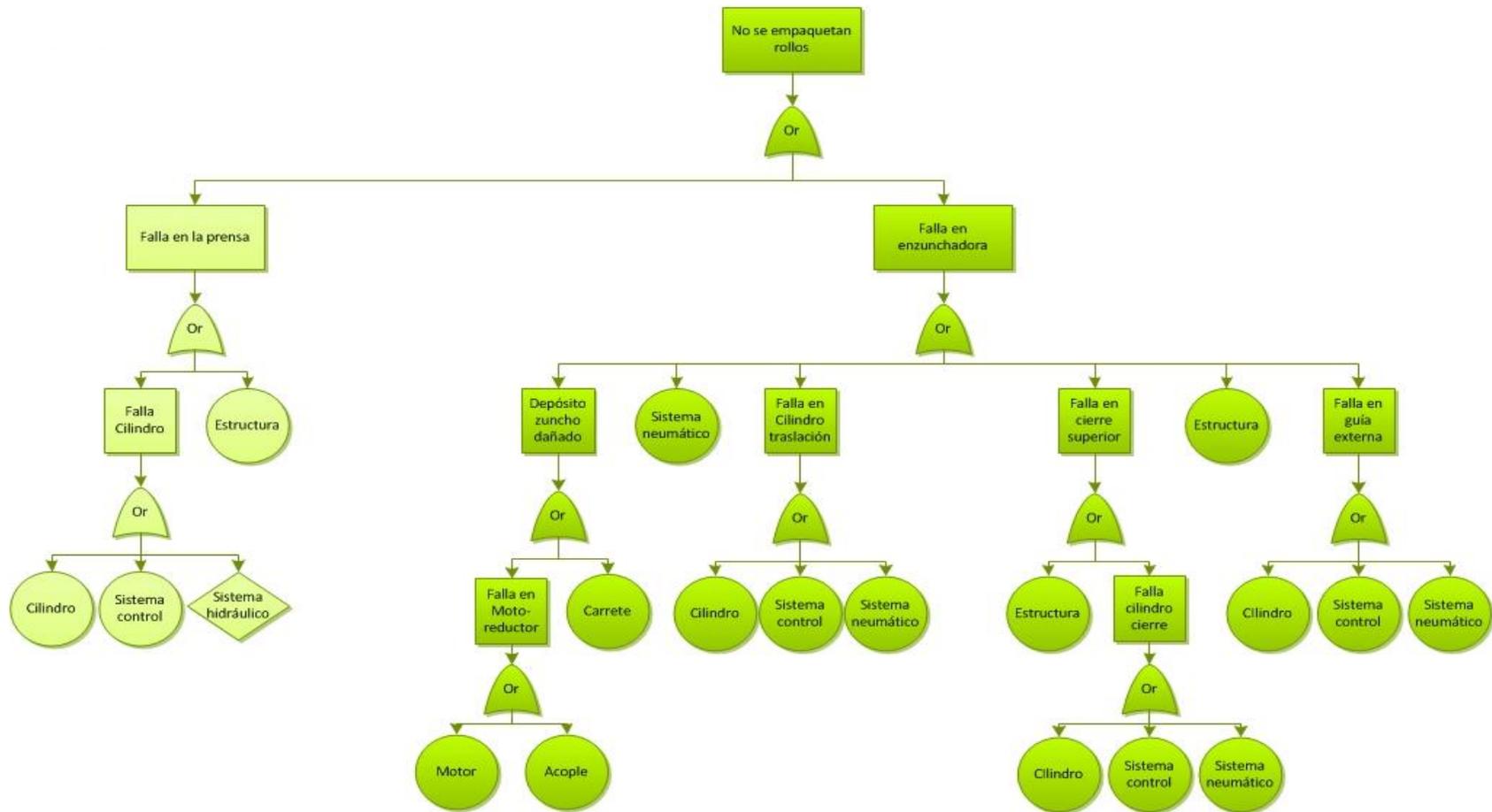


Figura 40: Árbol de falla para función “Transporte de rollos” en zona Rollos



Árbol de falla para función
“Empaquetar Rollos”

Figura 41: Árbol de falla para función “Empaquetar rollos” en zona Rollos

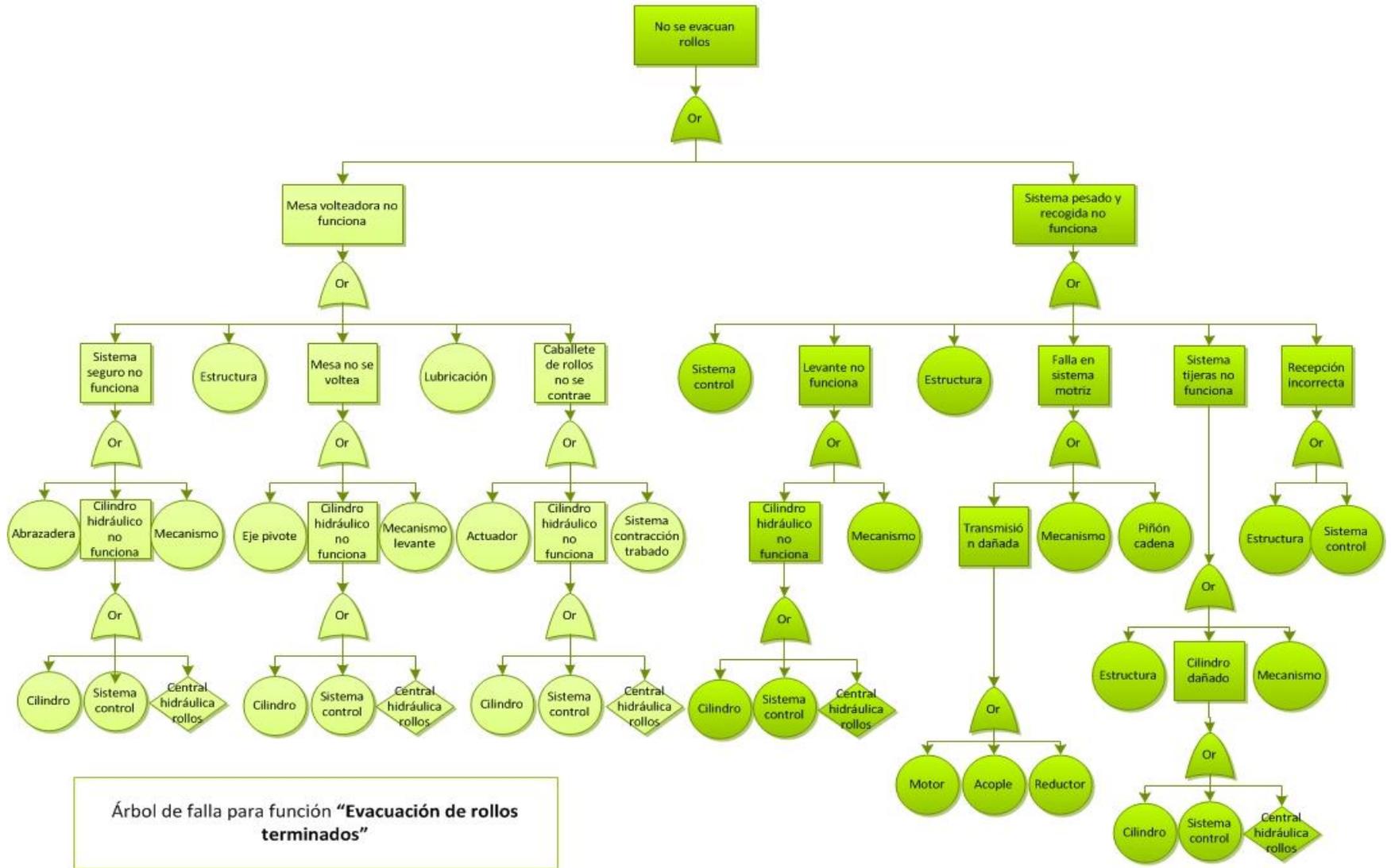


Figura 42: Árbol de falla para función "Evacuación de rollos terminados"

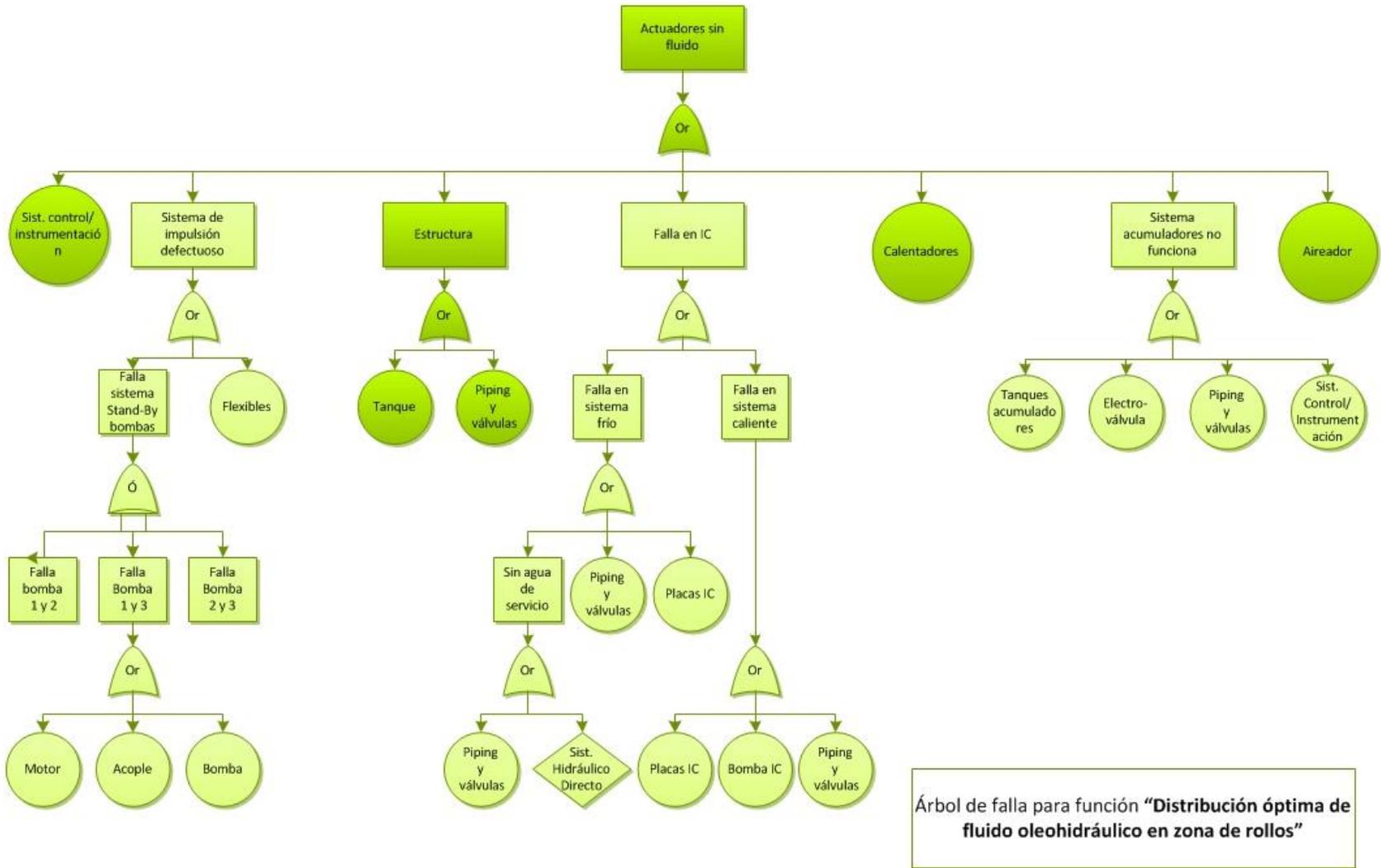


Figura 43: Árbol de falla para función "Distribución óptima de fluido oleo hidráulico en zona de rollos" en zona de Rollos

4.2 Matriz de Criticidad y selección equipos críticos

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron dos modelos distintos para definir la criticidad de los equipos. El Modelo 1 se basa en la fórmula de consecuencia y el Modelo 2 se basa en la ponderación de los distintos factores que afectan la criticidad.

A continuación se muestran los resultados para cada modelo.

4.2.1 Zona Horno

Modelo 1: Fórmula de consecuencia

Tabla 8: Criticidad para los equipos de la zona Horno según Modelo 1

Equipo	Sub Equipo	Puntaje Frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Consecuencia	Total	Criticidad
Solera Móvil	Solera fija	2	1	2	8	4	35	70	Semi-Crítico
	Cuba húmeda	2	1	4	2	2	9	18	No Crítico
	Solera móvil	2	4	2	10	4	46	92	Semi-Crítico
	Estructura	6	6	2	7	2	22	132	Crítico
	Pistón	2	1	2	6	4	27	54	No Crítico
	Sist. Hidraulico	4	6	4	2	1	12	48	No Crítico
	Solera móvil	2	4	2	10	4	46	92	Semi-Crítico
	Instrumentación	4	6	2	2	1	10	40	No Crítico
	Sist. Control	2	2	2	2	1	6	12	No Crítico
Zona descarga	Kick-Off	6	8	2	6	4	34	204	Crítico
	Sist. Control K-O	6	6	2	7	2	22	132	Crítico
	Instrumentación	4	2	2	2	1	6	24	No Crítico
	Rod. Deshorn.	4	4	2	4	1	10	40	No Crítico
	Puerta Salida	2	2	2	2	1	6	12	No Crítico
Combustión	Ventilador	2	6	4	10	4	50	100	Semi-Crítico
	Válvula	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
	Instrumentación	6	8	4	7	2	26	156	Crítico
Sist. Control	PLC	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Panel comando	2	4	4	2	1	10	20	No Crítico
	Comunicaciones	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
Sist. Hidráulico	Bomba 3	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Bomba 1	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Bomba 4	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Sist. Filtro	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Piping	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico

Fuente: Elaboración propia.

Modelo 2: Ponderaciones

Tabla 9: Criticidad para equipos zona Horno según Modelo 2

Equipo	Sub Equipo	Puntaje Frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Total	Criticidad
Solera móvil	Solera fija	2	1	2	8	4,2	Semi-Crítico
	Cuba húmeda	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Solera móvil 1	2	4	2	10	5,6	Crítico
	Estructura	2	6	2	7	4,8	Crítico
	Pistón	2	1	2	6	3,4	Semi-Crítico
	Sist. Hidraulico	2	6	4	2	3,2	Semi-Crítico
	Solera móvil 2	2	4	2	10	5,6	Crítico
	Instrumentación	2	6	2	2	2,8	Semi-Crítico
	Sist. Control	2	2	2	2	2	No Crítico
Zona descarga	Kick-Off	2	8	2	6	4,8	Crítico
	Sist. Control K-O	2	6	2	7	4,8	Crítico
	Instrumentación	2	2	2	2	2	No Crítico
	Rod. Deshorn.	2	4	2	4	3,2	Semi-Crítico
	Puerta Salida	2	2	2	2	2	No Crítico
Combustión	Ventilador	2	6	4	10	6,4	Crítico
	Válvula	2	2	4	2	2,4	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	8	4	7	5,6	Crítico
Sist. Control	PLC	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Panel comando	2	4	4	2	2,8	Semi-Crítico
	Comunicaciones	2	2	4	2	2,4	Semi-Crítico
Sist. Hidráulico	Bomba 3	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Bomba 1	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Bomba 4	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Sist. Filtro	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Piping	2	2	4	2	2,4	Semi-Crítico

Fuente: Elaboración propia

Comparación modelos de criticidad

En la Tabla 10 se presenta la comparación entre los distintos equipos críticos entregados por cada uno de los modelos utilizados. Es posible ver que los equipos entregados por el Modelo 1 corresponden a un subconjunto de los equipos críticos presentes en el Modelo 2.

Tabla 10: Comparación entre equipos críticos según Modelo 1 y Modelo 2

Modelo	Equipo	Sub Equipo crítico
Modelo 1	Combustión	Instrumentación
	Solera Móvil	Estructura
	Zona descarga	Kick Off
		Sist. Control Kick Off
Modelo 2	Combustión	Instrumentación
		Ventilador
	Solera Móvil	Estructura
		Solera Móvil 1
		Solera Móvil 2
	Zona descarga	Kick Off
		Sist. Control Kick Off

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Zona Tren de Desbaste

Modelo 1: Fórmula de consecuencia

Tabla 11: Equipos críticos en la zona Tren de Desbaste según Modelo 1

Equipo	Sub Equipo	Puntaje frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje op.	Puntaje Flx.	Consecuencia	Total	Criticidad
Arrastrador 1	Inverter	2	1	2	1	1	4	8	No Crítico
	Sist. Neumático	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Instrumentación	2	1	2	5	2	13	26	No Crítico
Caja D1H	Cardán	2	6	2	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Drive	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Torre	2	2	4	4	2	14	28	No Crítico
	Instrumentación	6	6	2	7	5	43	258	Crítico
Caja D2V	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Torre	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Par cónico	2	1	2	4	2	11	22	No Crítico
Caja D3H	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Lubricación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Refrigeración	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Drive	2	6	2	2	1	10	20	No Crítico
	Altura cilindros	2	2	6	2	2	12	24	No Crítico
	Cardán	2	1	2	7	5	38	76	Semi-Crítico
Caja D4V	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
Caja D5H	Cardán	2	1	2	7	5	38	76	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Sist. Hidráulico	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Drive	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
Caja D6V	Drive	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Acople par cónico motor	2	1	2	4	2	11	22	No Crítico
	Acople par cónico reductor	2	1	2	4	2	11	22	No Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	10	5	58	116	Semi-Crítico
Central Lub.	Sist. Hidráulico	2	6	4	2	1	12	24	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Bomba 1	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	1	2	7	2	17	34	No Crítico
	Piping	2	4	4	2	1	10	20	No Crítico
	Refrigeración	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
Cizalla CVS1	Drive	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Instrumentación	6	6	2	2	1	10	60	Semi-Crítico
	Cizalla	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Motor	2	2	2	10	2	24	48	No Crítico

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: Ponderaciones

Tabla 12: Equipos críticos de zona Tren de Desbaste según Modelo 2

Equipo	Sub Equipo	Puntaje frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje op.	Total	Criticidad
Arrastrador 1	Inverter	2	1	2	1	1,4	No Crítico
	Sist. Neumático	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Instrumentación	2	1	2	5	3	Semi-Crítico
Caja D1H	Cardán	2	6	2	7	4,8	Crítico
	Drive	2	1	2	2	1,8	No Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	4,8	Crítico
	Torre	2	2	4	4	3,2	Semi-Crítico
	Instrumentación	4	6	2	7	5,2	Crítico
Caja D2V	Instrumentación	2	1	4	7	4,2	Semi-Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	4,8	Crítico
	Torre	2	1	4	4	3	Semi-Crítico
	Par cónico	2	1	2	4	2,6	Semi-Crítico
Caja D3H	Instrumentación	2	2	4	7	4,4	Semi-Crítico
	Lubricación	2	1	4	7	4,2	Semi-Crítico
	Refrigeración	2	1	2	2	1,8	No Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	3	Semi-Crítico
	Drive	2	6	2	2	2,8	Semi-Crítico
	Altura cilindros	2	2	6	2	2,8	Semi-Crítico
	Cardán	2	1	2	7	3,8	Semi-Crítico
Caja D4V	Instrumentación	2	1	4	7	4,2	Semi-Crítico
Caja D5H	Cardán	2	1	2	7	3,8	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	4,4	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	3	Semi-Crítico
	Sist. Hidráulico	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	4,8	Crítico
	Drive	2	1	2	2	1,8	No Crítico
Caja D6V	Drive	2	1	2	2	1,8	No Crítico
	Acople par cónico motor	2	1	2	4	2,6	Semi-Crítico
	Acople par cónico reductor	2	1	2	4	2,6	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	3	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	4,4	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	10	6	Crítico
	Sist. Hidráulico	2	6	4	2	3,2	Semi-Crítico
Central Lub.	Instrumentación	2	1	4	7	4,2	Semi-Crítico
	Bomba 1	2	1	2	2	1,8	No Crítico
	Motor	2	1	2	7	3,8	Semi-Crítico
	Piping	2	4	4	2	2,8	Semi-Crítico
	Refrigeración	2	1	4	2	2,2	No Crítico
Cizalla CVS1	Drive	2	1	2	2	1,8	No Crítico
	Instrumentación	4	6	2	2	3,2	Semi-Crítico
	Cizalla	2	1	4	4	3	Semi-Crítico
	Motor	2	2	2	10	5,2	Crítico

Comparación modelos de criticidad

En la Tabla 13 se muestran los distintos equipos críticos para la zona de Desbaste entregados por el Modelo 1 y Modelo 2. Se puede observar la diferencia entre ambos modelos, siendo el Modelo 2 más completo.

Tabla 13: Comparación entre equipos críticos según Modelo 1 y Modelo 2

Modelo	Equipo	Sub-Equipo Crítico
Modelo 1	Caja D1H	Instrumentación
Modelo 2	Caja D1H	Cardán
		Instrumentación
		Lubricación
	Caja D2V	Lubricación
	Caja D5H	Lubricación
	Caja D6V	Motor
Cizalla CVS1	Motor	

4.2.3 Zona Tren Medio

Modelo 1: Fórmula de frecuencia

Tabla 14: Equipos críticos de zona de Tren Medio según Modelo 1

Equipo	Sub Equipo	Puntaje	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Consecuencia	Total	Criticidad
Caja M7H	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Altura laminación	2	2	6	4	1	12	24	No Crítico
	Cardán	2	2	2	7	5	39	78	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Lubricación	6	8	4	7	5	47	282	Crítico
	Motor	2	1	2	10	5	53	106	Semi-Crítico
	Sist. Hidráulico	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
Caja M8V	Torre	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Motor	2	1	2	10	5	53	106	Semi-Crítico
Caja M9H	Lubricación	6	8	4	7	5	47	282	Crítico
	Cilindros	2	2	4	6	2	18	36	No Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Motor	2	1	2	10	5	53	106	Semi-Crítico
	Refrigeración	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
Caja M10V	Sist. Hidráulico	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
	Diferencial	2	2	2	4	2	12	24	No Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Drive	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Lubricación	4	2	4	7	5	41	164	Crítico
	Reductor	6	10	2	10	4	52	312	Crítico
Caja M11H	Machón Acople	2	2	2	4	2	12	24	No Crítico
	Sist. Hidráulico	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Cardán	4	8	2	7	5	45	180	Crítico
	Instrumentación	4	4	4	7	5	43	172	Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
Caja M12V	Lubricación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Machón Acople	2	1	2	4	2	11	22	No Crítico
	Cardán	2	1	2	7	5	38	76	Semi-Crítico
	Diferencial	2	6	2	4	2	16	32	No Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
Caja M13H	Torre	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Sist. Hidráulico	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
	Drive	2	4	2	2	1	8	16	No Crítico
	Instrumentación	6	4	4	7	5	43	258	Crítico
	Lubricación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Machón Acople	2	2	2	4	2	12	24	No Crítico
Caja M14V	Torre	2	6	4	4	2	18	36	No Crítico
	Sist. Hidráulico	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Drive	2	4	2	2	1	8	16	No Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico
	Instrumentación	4	4	4	7	5	43	172	Crítico
	Lubricación	4	4	4	7	5	43	172	Crítico
	Reductor	2	6	2	10	4	48	96	Semi-Crítico
	Sist. Hidráulico	2	4	4	2	1	10	20	No Crítico
Caja M14V	Motor	2	4	2	10	5	56	112	Semi-Crítico
	Refrigeración	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Torre	2	1	4	4	2	13	26	No Crítico

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Equipos críticos zona Tren Medio según Modelo 1 (Continuación)

Equipo	Sub Equipo	Puntaje	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Consecuencia	Total	Criticidad
F-Lazo 7-8	Estructura	2	1	6	4	1	11	22	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
F-Lazo 8-9	Estructura	2	1	6	4	1	11	22	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Snap shear	2	2	6	4	1	12	24	No Crítico
	Rodillos	2	2	2	6	2	16	32	No Crítico
F-Lazo 9-10	Estructura	2	2	6	4	1	12	24	No Crítico
	Rodillos	2	1	2	6	2	15	30	No Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Sist. Neumático	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
F-Lazo 10-11	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
F-Lazo 11-12	Estructura	2	1	6	4	1	11	22	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
F-Lazo 13-14	Estructura	2	2	6	4	1	12	24	No Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Sist. Neumático	4	6	4	2	1	12	48	No Crítico
	Snap shear	2	1	6	4	1	11	22	No Crítico
	Rodillos	2	1	2	6	2	15	30	No Crítico
Lubricación A-A	Estanque	2	1	4	8	2	21	42	No Crítico
	Piping	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
	Válv. Distribución	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Válv. Descarga	2	2	2	2	1	6	12	No Crítico
Lubricación	Sist. Recirculación	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Instrumentación	2	1	2	7	5	38	76	Semi-Crítico
Lubricación Grasa	Bomba	2	1	2	2	1	5	10	No Crítico
	Piping	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Valv. Descarga	2	2	2	2	1	6	12	No Crítico
	Válv. Distribución	2	4	2	2	1	8	16	No Crítico

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: Ponderaciones

Tabla 15: Equipos críticos en zona de Tren Medio según Modelo 2

Equipo	Sub Equipo	Puntaje Frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Total	Criticidad
Caja M7H	Instrumentación	2	2	4	7	1	4,4	Semi-Crítico
	Altura laminación	2	2	6	4	1	3,6	Semi-Crítico
	Cardán	2	2	2	7	2	4	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico
	Lubricación	4	8	4	7	1	6	Crítico
	Motor	2	1	2	10	4	5	Crítico
	Sist. Hidráulico	2	2	4	2	1	2,4	Semi-Crítico
Torre	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico	
Caja M8V	Fijación Stand	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
	Motor	2	1	2	10	4	5	Crítico
	Lubricación	4	8	4	7	1	6	Crítico
Caja M9H	Cilindros	2	2	4	6	2	4	Semi-Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	1	4,8	Crítico
	Motor	2	1	2	10	4	5	Crítico
	Refrigeración	2	1	2	2	1	1,8	No Crítico
	Sist. Hidráulico	2	2	4	2	1	2,4	Semi-Crítico
Caja M10V	Diferencial	2	2	2	4	2	2,8	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico
	Drive	2	1	2	2	1	1,8	No Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	1	4,4	Semi-Crítico
	Lubricación	2	2	4	7	1	4,4	Semi-Crítico
	Reductor	4	10	2	10	4	7,2	Crítico
	Machón Acople	2	2	2	4	2	2,8	Semi-Crítico
Sist. Hidráulico	2	1	4	2	1	2,2	No Crítico	
Caja M11H	Cardán	2	8	2	7	2	5,2	Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	1	4,8	Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico
	Lubricación	2	2	4	7	1	4,4	Semi-Crítico
	Machón Acople	2	1	2	4	2	2,6	Semi-Crítico
Caja M12V	Cardán	2	1	2	7	2	3,8	Semi-Crítico
	Diferencial	2	6	2	4	2	3,6	Semi-Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	1	4,8	Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	1	4,8	Crítico
	Torre	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico
	Sist. Hidráulico	2	2	4	2	1	2,4	Semi-Crítico
Caja M13H	Instrumentación	4	4	4	7	1	5,2	Crítico
	Drive	2	1	2	2	1	1,8	No Crítico
	Lubricación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
	Machón Acople	2	2	2	4	2	2,8	Semi-Crítico
	Torre	2	6	4	4	2	4	Semi-Crítico
	Sist. Hidráulico	2	1	4	2	1	2,2	No Crítico
Caja M14V	Drive	2	4	2	2	1	2,4	Semi-Crítico
	Fijación Stand	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	1	4,8	Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	1	4,8	Crítico
	Reductor	2	6	2	10	4	6	Crítico
	Sist. Hidráulico	2	4	4	2	1	2,8	Semi-Crítico
	Motor	2	4	2	10	4	5,6	Crítico
	Refrigeración	2	1	2	2	1	1,8	No Crítico
Torre	2	1	4	4	2	3	Semi-Crítico	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Equipos críticos en zona Tren Medio según Modelo 2 (Continuación)

Equipo	Sub Equipo	Puntaje Frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Total	Criticidad
F-Lazo 7-8	Estructura	2	1	6	4	1	3,4	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
F-Lazo 8-9	Estructura	2	1	6	4	1	3,4	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
	Snap shear	2	2	6	4	1	3,6	Semi-Crítico
	Rodillos	2	2	2	6	2	3,6	Semi-Crítico
F-Lazo 9-10	Estructura	2	2	6	4	1	3,6	Semi-Crítico
	Rodillos	2	1	2	6	2	3,4	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	1	4,4	Semi-Crítico
	Sist. Neumático	2	1	4	2	1	2,2	No Crítico
F-Lazo 10-11	Instrumentación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
F-Lazo 11-12	Estructura	2	1	6	4	1	3,4	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
F-Lazo 13-14	Estructura	2	2	6	4	1	3,6	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	2	4	7	1	4,4	Semi-Crítico
	Sist. Neumático	2	6	4	2	1	3,2	Semi-Crítico
	Snap shear	2	1	6	4	1	3,4	Semi-Crítico
	Rodillos	2	1	2	6	2	3,4	Semi-Crítico
Lubricación A-A	Estanque	2	1	4	8	2	4,6	Crítico
	Piping	2	2	4	2	1	2,4	Semi-Crítico
	Válv. Distribución	2	1	2	2	1	1,8	No Crítico
	Válv. Descarga	2	2	2	2	1	2	No Crítico
Lubricación	Sist. Recirculación	2	1	4	2	1	2,2	No Crítico
	Instrumentación	2	1	2	7	1	3,8	Semi-Crítico
Lubricación Grasa	Bomba	2	1	2	2	1	1,8	No Crítico
	Piping	2	1	4	2	1	2,2	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	1	4,2	Semi-Crítico
	Valv. Descarga	2	2	2	2	1	2	No Crítico
	Válv. Distribución	2	4	2	2	1	2,4	Semi-Crítico

Fuente: Elaboración propia

Comparación modelos

En la Tabla 16 se muestran los distintos equipos críticos para la zona de Tren Medio entregados por el Modelo 1 y Modelo 2. Se puede observar la diferencia entre ambos modelos, siendo el Modelo 2 más completo.

Tabla 16: Comparación entre equipos críticos según Modelo 1 y Modelo 2

Modelo	Equipo	Sub Equipo crítico
Modelo 1	Caja M10V	Lubricación
		Reductor
	Caja M11H	Cardán
		Instrumentación
	Caja M13H	Instrumentación
	Caja M14V	Instrumentación
		Lubricación
Caja M7H	Lubricación	
Caja M8V	Lubricación	
Modelo 2	Caja M10V	Reductor
	Caja M11H	Cardán
		Instrumentación
	Caja M12V	Instrumentación
		Lubricación
	Caja M13H	Instrumentación
	Caja M14V	Instrumentación
		Lubricación
		Motor
	Caja M7H	Reductor
		Lubricación
	Caja M8V	Lubricación
		Motor
	Caja M9H	Lubricación
Motor		
Lubricación	Estanque	

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Zona Monoblock

Modelo 1: Fórmula de consecuencia

Tabla 17: Equipos críticos para zona Monoblock según Modelo 1

Equipo	Sub Equipo	Puntaje frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Consecuencia	Total	Criticidad
Block Cajas 15-24	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Motor	6	8	2	10	5	60	360	Crítico
	Refrigeración	2	1	2	4	1	7	14	No Crítico
	Stand 16	2	2	2	6	2	16	32	No Crítico
	Stand 17	2	6	2	6	2	20	40	No Crítico
	Stand 22	2	4	2	6	2	18	36	No Crítico
	Stand 24	2	2	2	6	2	16	32	No Crítico
Caja agua N4	Instrumentación	2	2	4	7	5	41	82	Semi-Crítico
	Striper	2	1	2	4	1	5	10	No Crítico
Central Lub. MB	Central Morgan	2	1	2	3	3	12	24	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Filtro 20	2	1	2	3	3	12	24	No Crítico
Cizalla CVS2	Desviador	2	6	4	4	2	18	36	No Crítico
	Cizalla	2	6	4	7	5	45	90	Semi-Crítico
	Motor	4	6	2	10	5	58	232	Crítico
	Muela	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Sist. Control	6	6	4	7	5	45	270	Crítico
	Sist. Lubricación	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
	Sist. Neumático	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
Monoblock	Sist. Control	4	6	4	2	1	12	48	No Crítico
	Monoblock	6	8	4	7	5	47	282	Crítico
F-lazo	Estructura	2	2	6	4	1	12	24	No Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: Ponderaciones

Tabla 18: Equipos críticos en zona Monoblock según Modelo 2

Equipo	Sub Equipo	Puntaje frec.	Puntaje costo	Puntaje amb.	Puntaje Op.	Total	Criticidad
Block Cajas 15-24	Instrumentación	2	2	4	7	4,4	Semi-Crítico
	Motor	4	8	2	10	6,8	Crítico
	Refrigeración	2	1	2	4	2,6	Semi-Crítico
	Stand 16	2	2	2	6	3,6	Semi-Crítico
	Stand 17	2	6	2	6	4,4	Semi-Crítico
	Stand 22	2	4	2	6	4	Semi-Crítico
	Stand 24	2	2	2	6	3,6	Semi-Crítico
Caja agua N4	Instrumentación	2	2	4	7	4,4	Semi-Crítico
	Striper	2	1	2	4	2,2	No Crítico
Central Lub. MB	Central Morgan	2	1	4	3	1,8	No Crítico
	Instrumentación	2	1	4	7	4,2	Semi-Crítico
	Filtro 20	2	1	2	3	1,8	No Crítico
Cizalla CVS2	Desviador	2	6	4	4	4	Semi-Crítico
	Cizalla	2	6	4	7	5,2	Crítico
	Motor	2	6	2	10	6	Crítico
	Muela	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	4,8	Crítico
	Sist. Control	4	6	4	7	5,6	Crítico
	Sist. Lubricación	2	2	4	2	2,4	Semi-Crítico
	Sist. Neumático	2	2	4	2	2,4	Semi-Crítico
Monoblock	Sist. Control	2	6	4	2	3,2	Semi-Crítico
	Monoblock	4	8	4	7	6	Crítico
F-lazo	Estructura	2	2	6	4	3,6	Semi-Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	4,8	Crítico

Fuente: Elaboración propia

Comparación de modelos

Tabla 19: Comparación entre equipos críticos según Modelos 1 y Modelo 2

Modelo	Equipos	Sub Equipos
Modelo 1	Block Cajas	Motor
	Cizalla CVS	Motor
		Sist. Cont
	Monoblock	Monoblock
Modelo 2	Block Cajas	Motor
	Cizalla CVS	Cizalla
		Instrumentación
		Motor
		Sist. Control
	F-Lazo	Instrumentación
	Monoblock	Monoblock

Fuente: Elaboración propia

Nuevamente, como puede verse en la Tabla 19 el Modelo 2 es más completo que el Modelo 1.

4.2.5 Zona Frenacola

Modelo 1: Fórmula de consecuencia

Equipo	Subequipo	Puntaje	Puntaje cts.	Puntaje amb	Puntaje Op.	Puntaje Flx.	Consecuencia	Total	Criticidad
Frenacola derecho	Cardán, eje, regulación	6	6	2	7	5	43	258	Crítico
	Acoplamiento	2	1	2	4	2	11	22	No Crítico
	Discos	2	1	2	4	2	11	22	No Crítico
	Drive	2	2	2	2	1	6	12	No Crítico
	Lubricación	2	1	4	7	5	40	80	Semi-Crítico
	Instrumentación	6	6	4	7	5	45	270	Crítico
	Motor	2	1	2	10	5	53	106	Semi-Crítico
	Sist. Control	2	2	4	2	1	8	16	No Crítico
Sist. Neumático	6	6	4	7	5	45	270	Crítico	
Frenacola izquierdo	Cardán, eje, regulación	2	2	2	7	5	39	78	Semi-Crítico
	Drive	2	2	2	2	1	6	12	No Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	5	43	86	Semi-Crítico
	Motor	2	4	2	10	5	56	112	Semi-Crítico
	Sist. Control	2	1	4	2	1	7	14	No Crítico
	Sist. Neumático	6	6	4	7	5	45	270	Crítico

Tabla 20: Equipos críticos de zona Frenacola según Modelo 1

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: Ponderación

Tabla 21: Equipos críticos en zona Frenacola según Modelo 2

Equipo	Subequipo	Puntaje frec.	Puntaje costo	Puntaje amb	Puntaje Op.	Total	Criticidad
Frenacola derecho	Cardán, eje, regulación	6	6	2	7	5,6	Crítico
	Acoplamiento	2	1	2	4	2,6	Semi-Crítico
	Discos	2	1	2	4	2,6	Semi-Crítico
	Drive	2	2	2	2	2	No Crítico
	Lubricación	2	1	4	7	4,2	Semi-Crítico
	Instrumentación	4	6	4	7	5,6	Crítico
	Motor	2	1	2	10	5	Crítico
	Sist. Control	2	2	4	2	2,4	Semi-Crítico
Sist. Neumático	4	6	4	7	5,6	Crítico	
Frenacola izquierdo	Cardán, eje, regulación	2	2	2	7	4	Semi-Crítico
	Drive	2	2	2	2	2	No Crítico
	Instrumentación	2	4	4	7	4,8	Crítico
	Lubricación	2	4	4	7	4,8	Crítico
	Motor	2	4	2	10	5,6	Crítico
	Sist. Control	2	1	4	2	2,2	No Crítico
	Sist. Neumático	4	6	4	7	5,6	Crítico

Fuente: Elaboración propia

Comparación modelos

Según lo expuesto en la Tabla 22, el Modelo 2 es más completo que el Modelo 1.

Tabla 22: Comparación Equipos críticos en Zona Frenacola según Modelo 1 y Modelo 2

Modelo	Equipo	Sub-Equipo
Modelo 1	Frenacola Derecho	Cardán, eje, regulación
		Instrumentación
		Sist. Neumático
	Frenacola Izquierdo	Sist. Neumático
Modelo 2	Frenacola Derecho	Cardán, eje, regulación
		Instrumentación
		Motor
		Sist. Neumático
	Frenacola Izquierdo	Instrumentación
		Lubricación
		Motor
		Sist. Neumático

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Resumen resultados

Considerando los resultados de las matrices de criticidad obtenidas por medio de ambos modelos, se concluye utilizar el Modelo 2. Esto debido a que entrega una mayor cantidad de información y a que se ajusta fielmente a la experiencia recogida por los encargados de la planta de laminación.

A continuación, en la Tabla 23, se presenta un resumen de los equipos críticos obtenidos para cada zona según el Modelo 2.

Tabla 23: Resumen equipos críticos por zona según Modelo 2 (Propuesta de equipos críticos)

	Equipo	Subequipo	Criticidad	Porcentaje criticidad
Horno	Combustión	Instrumentación	5,6	60,87
		Ventilador	6,4	69,57
	Solera móvil	Estructura	4,8	52,17
		Solera móvil 1	5,6	60,87
		Solera móvil 2	5,6	60,87
	Zona Descarga	Kick-Off	4,8	52,17
Sist. Control K.O.		4,8	52,17	
Desbsate				
	Equipo	Subequipo	Criticidad	Porcentaje criticidad
Desbsate	Caja D1H	Cardán	4,8	52,17
		Instrumentación	5,2	56,52
		Lubricación	4,8	52,17
	Caja D2V	Lubricación	4,8	52,17
	Caja D5H	Lubricación	4,8	52,17
	Caja D6V	Motor	6	65,22
	Cizalla CVS1	Motor	5,2	56,52
Tren Medio				
	Equipo	Subequipo	Criticidad	Porcentaje criticidad
Tren Medio	Caja M10V	Reductor	7,2	78,26
	Caja M11H	Cardán	5,2	56,52
		Instrumentación	4,8	52,17
	Caja M12V	Instrumentación	4,8	52,17
		Lubricación	4,8	52,17
	Caja M13H	Instrumentación	5,2	56,52
	Caja M14V	Instrumentación	4,8	52,17
		Lubricación	4,8	52,17
		Motor	5,6	60,87
		Reductor	6	65,22
	Caja M7H	Lubricación	6	65,22
		Motor	5	54,35
	Caja M8V	Lubricación	6	65,22
		Motor	5	54,35
	Caja M9H	Lubricación	4,8	52,17
Motor		5	54,35	
Lubricación A-A	Estanque	4,6	50,00	
Monoblock				
	Equipo	Subequipo	Criticidad	Porcentaje criticidad
Monoblock	Block Cajas 15-24	Motor	6,8	72,34
	Cizalla CVS2	Cizalla	5,2	55,32
		Instrumentación	4,8	51,06
		Motor	6	63,83
		Sist. Control	5,6	59,57
	F-lazo	Instrumentación	4,8	51,06
Monoblock	Monoblock	6	63,83	
Frenacola				
	Equipo	Subequipo	Criticidad	Porcentaje criticidad
Frenacola	Frenacola derecho	Cardán, eje, regulación	5,6	60,87
		Instrumentación	5,6	60,87
		Motor	5	54,35
		Sist. Neumático	5,6	60,87
	Frenacola izquierdo	Instrumentación	4,8	52,17
		Lubricación	4,8	52,17
		Motor	5,6	60,87
		Sist. Neumático	5,6	60,87

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la empresa ha seleccionado, según la alta criticidad y la conveniencia de la planta los siguientes equipos críticos:

- Zona Horno:
 - **Ventilador aire combustión**
 - **Sistema Kick-Off**
- Zona Desbaste y Tren Medio
 - **Central Lubricación**
- Zona Monoblock
 - **Motor monoblock**
- Zona Frenacola
 - **Sistema Neumático**

4.3 FMECA

4.3.1 Ventilador de aire combustión

Tabla 24: FMECA para primer subsistema (Motor) analizado en ventilador de aire/combustión

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efectos	Tarea propuesta	
1	Motor	Entregar energía mecánica necesaria para el funcionamiento adecuado del ventilador	Motor no arranca	1.1	Rotor trabado por sobrecarga mecánica.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Inspección general motor.
				1.2	Rotor trabado por eje torcido.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Inspección general motor.
				1.3	Baja aislación por presencia de humedad y/o lubricación en bobinado.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Medir aislación.
				1.4			Mantenimiento General motor .
				1.5			Inspección General motor .
				1.6	Baja aislación por presencia de humedad en caja de conexiones.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Medir aislación.
				1.7			Mantenimiento general motor .
				1.8			Inspección general motor .
				1.9	Ausencia de una fase por deterioro eléctrico o mecánico de borne de conexiones.	Motor vibra pero no parte.	Revisión, limpieza y reapriete de conexiones.
				1.10	Ausencia de una fase por daño de alimentador.	Motor vibra pero no parte.	Medir aislación.
				1.11	Ausencia de una fase por conexión en mal estado.	Motor vibra pero no parte.	Revisión y reapriete de conexiones.
				1.12	Falla en accionamiento de potencia en CCM.	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica.	Mantenimiento general CCM.
				1.13	Falla en sistema de control y protección de CCM.	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica.	Mantenimiento general CCM.
			1.14	Motor se detiene	Sobrecalentamiento de bobinado estator debido a sobrecarga mecánica en el eje	Activación de protección térmica.	Analizar consumo de corriente
			1.15		Cortocircuito en bobinado.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Mantenimiento general motor .
			1.16		Desbalance mecánico.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Control de vibraciones.
			1.17		Desbalance eléctrico.	Activación de protección eléctrica por corriente diferencial o sobrecarga.	Analizar consumo de corriente
			1.18		Tapas trasera suelta.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Inspección visual del motor.
			1.19		Rodamiento en mal estado.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Control de vibraciones.
			1.20				Cambiar rodamiento según horas de servicio.
			1.21		Movimiento axial y/o radial del Eje.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Control de vibraciones.
			1.22		Aumento de temperatura en estator por suciedad en carcasa.	Activación de protección térmica.	Inspección carcasa.
			1.23				Mantenimiento general motor .
			1.24	Calentamiento excesivo de rodamientos por desbalance.	Activación de protección térmica.	Control de vibraciones.	
			1.25	Motor trabaja con parámetros anormales de funcionamiento	Rotor desbalanceado.	Aumento de consumo de corriente.	Control de vibraciones.
			1.26		Acomplamiento suelto	Aumento de consumo de corriente.	Control de vibraciones.
			1.27		Sistema de anclaje suelto.	Aumento de consumo de corriente.	Inspección general motor .

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: FMECA para segundo y tercer subsistema (Sistema de ventilación y Suministro, respectivamente) analizados para ventilador aire/combustión

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efectos	Tarea propuesta	
2	Sistema ventilación	Entregar la cantidad de aire necesaria para generar la combustión	Ventilador no gira	2.1	Rotura del acople	No se transmite energía desde el motor al eje	Reemplazar acople
				2.2	Acople suelto (Fijación a ejes respectivos)	Energía transmitida de motor al eje no es la adecuada	Ajustar unión acople-eje
				2.3			Inspeccionar acople
				2.4		Deformación en sector de fijaciones	Reemplazar acople
				2.5			Inspeccionar fijaciones
				2.6	Eje trabado por desbalance	No hay movimiento en ventilador	Inspeccionar el eje
				2.7		Vibraciones en el eje	Medir vibraciones
				2.8	Eje trabado por desalineamiento	Ruidos	Inspeccionar descansos
				2.9		Rodetes mal balanceados	Limpieza álabes
				2.10		Daño en descansos (Rodamientos)	Reemplazar descansos
				2.11		No hay movimiento en ventilador	Inspeccionar el eje
				2.12	Eje trabado por desalineamiento	Daño en descansos (Rodamientos)	Reemplazar descansos
				2.13		Vibraciones en el eje	Medir vibraciones
				2.14		Ruidos	Medir vibraciones
				2.15		Deformación en el eje	Reemplazar el eje
				2.16	Eje roto	No hay movimiento en ventilador	Reemplazar el eje
3	Suministro	Permitir o impedir el paso de aire hacia las tuberías	Ingreso de aire inadecuado	3.1	Servomotor dañado	Válvula trabada	Limpieza compuertas
				3.2		Exceso de aire en tubería	Revisión mecanismo servomotor
				3.3		Falta de aire en tubería	Lubricación servomotor
				3.4		Ruidos	Medir vibraciones
				3.5	Escape de aire	Mangas de unión en mal estado	Cambiar mangas

4.3.2 Sistema Kick-Off

Tabla 26: FMECA para sistema Kick-Off

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efectos	Tarea propuesta	
1	Sensor de palanquilla	Detectar si la palanquilla se encuentra en sector de salida	No hay detección	1.1	Cilindro defectuoso	Vástago trabado	Reparar o reemplazar cilindro
				1.2		Vástago suelto	Reparar o reemplazar cilindro
				1.3		Exceso de aire en cilindro (Rebote)	Liberar aire en exceso
				1.4	Anclaje cilindro deteriorado	Cilindro suelto	Ajustar fijaciones cilindro - estructura
				1.5	Sistema oleohidráulico dañado	Filtraciones	Inspeccionar sistema oleohidráulico correspondiente
				1.6			
				1.7	Soportes de sensor en mal estado	Sensor no se desplaza	Inspeccionar estado de estructura
				1.8	Sensor deformado	Detecciones erróneas o inexistentes	Modalidad manual
				1.9		Atascamiento	Cambio de sensor
				1.10		Caida de palanquilla	Inspección sensor palanquilla
1.11	Problema de comunicación	Detecciones erróneas o inexistentes	Análisis de resultados del sensor				
2	Sistema traslación	Extraer la palanquilla desde las soleras del horno	No hay traslación	2.1	Cilindro defectuoso	Vástago trabado	Reparar o reemplazar cilindro
				2.2		Vástago suelto	Reparar o reemplazar cilindro
				2.3		Exceso de aire en cilindro (Rebote)	Liberar aire en exceso
				2.4	Ruedas atascadas	Ruedas deformadas	Reemplazar ruedas
				2.5		Rodamientos gastados	Reemplazar rodamientos
				2.6		Ruidos	Medir vibraciones
				2.7	Fatiga Piñón - Cremallera	Dientes desgastados	Reparar pieza
				2.8		Ruidos	Medir vibraciones
				2.9		Vibraciones	Medir vibraciones
				2.10	Sistema oleohidráulico dañado	Filtraciones	Inspeccionar piping
			No hay ascenso	2.11	Cilindro defectuoso	Vástago trabado	Reparar o reemplazar cilindro
				2.12		Vástago suelto	Reparar o reemplazar cilindro
				2.13		Exceso de aire en cilindro (Rebote)	Liberar aire en exceso
				2.14	Sistema oleohidráulico dañado	Filtraciones	Inspeccionar piping
				2.15	Articulación en mal estado	Rótulas dañadas	Reemplazar rótulas
				2.16		Soportes en mal estado	Reemplazar piezas dañadas

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Sistema lubricación Tren de desbaste y Tren medio

Tabla 27: FMECA para los primeros dos subsistemas analizados (Bombas y Motor de bombas, respectivamente) para sistema de lubricación de tren de desbaste y tren medio.

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efectos	Tarea propuesta	
1	Bombas	Impulsar el fluido de trabajo a lo largo del sistema	No hay impulsión	1.1	Rotor bomba trabado	Caida de presión en línea	Mantenimiento general bomba
				1.2		Aumento de consumo de corriente.	Medición de caudal y presión
				1.3		Caida de presión en línea	Inspección bombas
				1.4	Rodamiento rotor dañado	Aumento consumo de corriente	Reemplazo rodamiento
				1.5		Ruidos	Medición vibraciones
				1.6		Aumento vibraciones	Medición vibraciones
				1.7		Caida de presión en línea	Reemplazo bomba o reparación rotor
				1.8	Rotor dañado (Óxido, corrosión, cavitación, desgaste mecánico, etc.)	Aumento vibraciones	Medición vibraciones
				1.9		Ruidos	Medición vibraciones
				1.10		Presencia de impurezas en fluido	Inspección filtros
				1.11		Caida de presión en línea	Reparación estator o reemplazo de bomba
				1.12	Estator bomba dañado (Óxido, corrosión, desgaste mecánico, etc.)	Fuga de fluido visible	Inspección carcasa bombas
2	Motor Bombas	Entregar energía mecánica para el funcionamiento de las bombas	Motor no arranca	2.1	Rotor trabado por sobrecarga mecánica.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Inspección general motor.
				2.2	Rotor trabado por eje torcido.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Inspección general motor.
				2.3			Medir aislación.
				2.4	Baja aislación por presencia de humedad y/o lubricación en bobinado.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Mantenimiento General motor .
				2.5			Inspección General motor .
				2.6			Medir aislación.
				2.7	Baja aislación por presencia de humedad en caja de conexiones.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Mantenimiento general motor .
				2.8			Inspección general motor .
				2.9	Ausencia de una fase por deterioro eléctrico o mecánico de borne de conexiones.	Motor vibra pero no parte.	Revisión, limpieza y reapriete de conexiones.
				2.10	Ausencia de una fase por daño de alimentador.	Motor vibra pero no parte.	Medir aislación.
				2.11	Ausencia de una fase por conexión en mal estado.	Motor vibra pero no parte.	Revisión y reapriete de conexiones.
				2.12	Falla en accionamiento de potencia en CCM.	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica.	Mantenimiento general CCM.
				2.13	Falla en sistema de control y protección de CCM.	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica.	Mantenimiento general CCM.
			2.14	Sobrecalentamiento de bobinado estator debido a sobrecarga mecánica en el eje	Activación de protección térmica.	Analizar consumo de corriente	
			2.15	Cortocircuito en bobinado.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Mantenimiento general motor .	
			2.16	Desbalance mecánico.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Control de vibraciones.	
			2.17	Desbalance eléctrico.	Activación de protección eléctrica por corriente diferencial o sobrecarga.	Analizar consumo de corriente	
			2.18	Tapas trasera suelta.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Inspección visual del motor.	
			2.19		Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Control de vibraciones.	
			2.20	Rodamiento en mal estado.		Cambiar rodamiento según horas de servicio.	
			2.21	Movimiento axial y/o radial del Eje.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Control de vibraciones.	
			2.22		Activación de protección térmica.	Inspección carcasa.	
			2.23	Aumento de temperatura en estator por suciedad en carcasa.		Mantenimiento general motor .	
			2.24	Calentamiento excesivo de rodamientos por desbalance.	Activación de protección térmica.	Control de vibraciones.	
			2.25	Rotor desbalanceado.	Aumento de consumo de corriente.	Control de vibraciones.	
			2.26	Acomplamiento suelto	Aumento de consumo de corriente.	Control de vibraciones.	
			2.27	Sistema de anclaje suelto.	Aumento de consumo de corriente.	Inspección general motor .	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: FMECA para tercer y cuarto subsistema analizado (Sist. De intercambio térmico y Estructura y condición del lubricante) para sistema de lubricación del Tren de desbaste y Tren medio

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efectos	Tarea propuesta	
3	Sistema de intercambio térmico	Otorgar a los fluidos del sistema la temperatura adecuada	Lubricante a temperatura inapropiada	3.1	Placas obstruidas	Aumento consumo de corriente	Inspección general intercambiadores
				3.2		Aumento o disminución de temperatura	Reemplazo intercambiadores
				3.3	Placas dañadas (corrosión, desgaste mecánico, etc.)	Aumento consumo de corriente	Inspección general intercambiadores
				3.4		Aumento o disminución de temperatura	Reemplazo intercambiadores
				3.5	Tuberías en mal estado	Filtraciones en tubería	Inspección piping del sistema de lubricación
				3.6		Caída de presión en línea	Reparación de filtraciones
				3.7	Válvulas obstruidas	Aumento o disminución de temperatura	Inspección válvulas
				3.8		Caída o aumento de presión en la línea	Reparación válvulas
				3.9	Válvulas dañadas	Aumento o disminución de temperatura	Inspección válvulas
				3.10		Caída o aumento de presión en la línea	Reemplazo válvulas
				3.11	Sensores de temperatura dañados	Viscosidad anormal en lubricante	Reemplazo sensores
4	Estructura y condición del lubricante	Mantener el lubricante en buenas condiciones de operación	Lubricante no apto	4.1	Filtro 1 tapado	Lubricante con impurezas	Limpiar filtro
				4.2		Nivel en filtro muy alto	Reducir nivel y limpiar filtro
				4.3	Filtro 2 tapado	Lubricante con impurezas	Limpiar filtro
				4.4		Nivel en filtro muy alto	Reducir nivel y limpiar filtro
				4.5	Calentadores defectuosos	Lubricante con alta viscosidad	Reparar calentadores
				4.6		Activación sensor temperatura	Revisar alarmas
				4.7	Bombas recirculación no funcionan	Lubricante con impurezas	Reemplazar/ reparar bombas
				4.8		Lubricante con alta viscosidad	Reemplazar/ reparar bombas
				4.9	Estanque con filtración	Descenso de nivel de lubricante	Reparar fuga
				4.10		Presencia de humedad en el exterior	Revisar exteriores y reparar
				4.11	Niveles defectuosos	Impurezas en el nivel	Reemplazar nivel
				4.12		Ausencia de fluido del nivel	Reemplazar nivel
				4.13	Instrumentación con mal funcionamiento	Válvulas atascadas	Reparar válvulas
				4.14		Válvulas dañadas	Reemplazar válvulas
4.15	Sensores de temperatura dañados	Reemplazar sensor de temp.					
4.16	Sensores de presión dañados	Reemplazar sensor de pres.					

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Motor del Monoblock

Tabla 29: FMECA para Motor del Monoblock

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta	
1	Motor Eléctrico	Proporciona energía mecánica necesaria para poner en movimiento la carga que se encuentra acoplada a él.	Motor no parte	1.1	Rotor trabado por sobrecarga mecánica.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Inspección general motor.
				1.2	Rotor trabado por eje torcido.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Inspección general motor.
				1.3	Baja aislación por presencia de humedad y/o lubricación en bobinado.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Medir aislación.
				1.4			Mantenimiento General motor .
				1.5			Inspección General motor .
				1.6	Baja aislación por presencia de humedad en caja de conexiones.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Medir aislación.
				1.7			Mantenimiento general motor .
				1.8	Inspección general motor .		
				1.9	Ausencia de una fase por deterioro eléctrico o mecánico de borne de conexiones.	Motor vibra pero no parte.	Revisión, limpieza y reapriete de conexiones.
				1.10	Ausencia de una fase por daño de alimentador.	Motor vibra pero no parte.	Medir aislación.
				1.11	Ausencia de una fase por conexión en mal estado.	Motor vibra pero no parte.	Revisión y reapriete de conexiones.
				1.12	Falla en accionamiento de potencia en CCM.	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica.	Mantenimiento general CCM.
				1.13	Falla en sistema de control y protección de CCM.	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica.	Mantenimiento general CCM.
			Motor se detiene	1.14	Sobrecalentamiento de bobinado estator debido a sobrecarga mecánica en el eje	Activación de protección térmica.	Analizar consumo de corriente
				1.15	Cortocircuito en bobinado.	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea.	Mantenimiento general motor .
				1.16	Desbalance mecánico.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga.	Control de vibraciones.
				1.17	Desbalance eléctrico.	Activación de protección eléctrica por corriente diferencial o sobrecarga.	Analizar consumo de corriente
				1.18	Tapas trasera suelta.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Inspección visual del motor.
				1.19	Rodamiento en mal estado.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Control de vibraciones.
				1.20			Cambiar rodamiento según horas de servicio.
				1.21	Movimiento axial y/o radial del Eje.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Control de vibraciones.
				1.22	Deterioro de jaula de ardilla rotor por roce con estator.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Mantenimiento general motor .
				1.23			Analizar consumo de corriente..
				1.24			Control de vibraciones.
				1.25	Barra cortada en jaula de ardilla rotor.	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea.	Mantenimiento general motor .
				1.26	Aumento de temperatura en estator por deficiencia en sistema de refrigeración.	Activación de protección térmica.	Control de vibraciones.
				1.27			Inspección sistema de refrigeración.
				1.28			Mantenimiento general motor .
				1.29	Aumento de temperatura en estator por suciedad en carcasa.	Activación de protección térmica.	Inspección carcasa.
				1.30			Mantenimiento general motor .
			1.31	Calentamiento excesivo de rodamientos por desbalance.	Activación de protección térmica.	Control de vibraciones.	
			1.32	Ventilador suelto.	Aumento de temperatura en carcasa.	Revisión ventilador y tapa deflectora.	
			Motor no trabaja bajo parámetros normales de funcionamiento.	1.33	Rotor desbalanceado.	Aumento de consumo de corriente.	Control de vibraciones.
				1.34	Acomplamiento suelto	Aumento de consumo de corriente.	Control de vibraciones.
				1.35	Sistema de anclaje suelto.	Aumento de consumo de corriente.	Inspección general motor .

Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Sistema neumático de frenacola

Tabla 30: FMECA para Sistema Neumático del Frenacola

#	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efectos	Tarea propuesta	
1	Cilindro neumático	Permitir el ajuste de los discos del frenacola	Ajuste de discos inadecuado	1.1	Cilindro no funciona	Vástago trabado	Mantenimiento cilindro
				1.2		Vástago suelto	Mantenimiento cilindro
				1.3	Cilindro rebota al retraer vástago	Exceso de aire en cámara del cilindro	Eliminar exceso aire y mantenimiento cilindro
				1.4		Fijaciones mal ajustadas	Ajuste de anclajes del cilindro
2	Piping y válvulas	Distribuir el aire en el sistema neumático	No hay accionamiento del cilindro	2.1	Válvula de paso sin funcionamiento	Válvula de paso trabada	Reparar válvula
				2.2		Válvula de paso dañada	Reemplazar válvula
				2.3	Válvula de bola sin funcionamiento adecuado	Válvula de bola trabada	Reparar válvula
				2.4		Válvula de bola dañada	Reemplazar válvula
				2.5	Filtro defectuoso	Membrana saturada	Inspección y limpieza filtro
				2.6	Flexible en mal estado	Filtración de aire	Reemplazar flexibles
3	Instrumentación	Mantener las condiciones de operación adecuadas	Condiciones anormales de operación	3.1	Sensor de presión	Presión inadecuada de aire en cilindro	Reemplazar sensor
				3.2	Manómetro	Medición inadecuada de presión	Reemplazar manómetro
				3.3	Nivel	Impurezas en el nivel	Reemplazar nivel
				3.4		Ausencia de fluido en el nivel	Reemplazar nivel

Fuente: Elaboración propia

4.4 Estimación de parámetros de Weibull

Para cada equipo crítico seleccionado se estimaron los parámetros de Weibull (β, γ, η) según el procedimiento presente en la Sección “3.3.1 Estimación parámetros de Weibull”. Cada estimación ha sido validada según el test de validación correspondiente. A continuación se presentan los resultados para cada equipo crítico.

4.4.1 Ventilador de aire combustión

En la Figura 44 se muestra el ajuste lineal realizado que posteriormente da origen a la estimación de parámetros de Weibull y el cálculo de la confiabilidad.

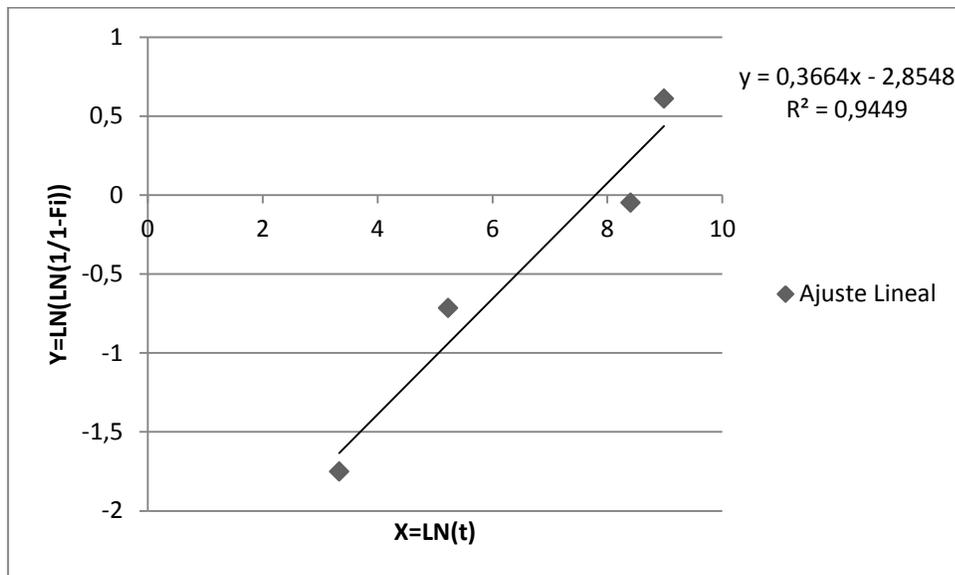


Figura 44: Ajuste lineal para ventilador aire combustión

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en el coeficiente de correlación (R^2). Este valor es bastante bajo. Sin embargo, la validez de la estimación de parámetros de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los parámetros obtenidos son:

Tabla 31: Parámetros de Weibull para Ventilador aire combustión

$\beta = 1,2$
$\gamma = 0$
$\eta = 323,878$

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo (Ver Figura 45)

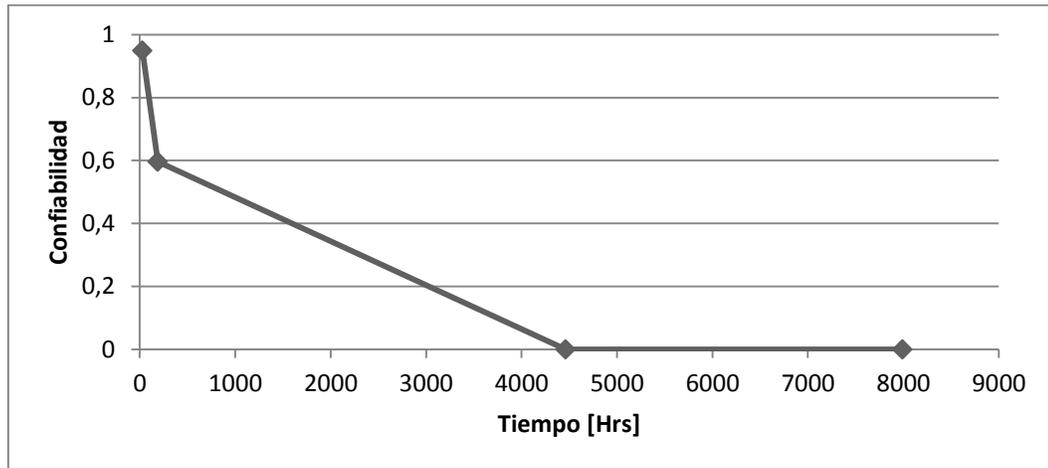


Figura 45: Confiabilidad para ventilador de aire combustión

Luego, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de validación Kolmogorov-Smirnov. En este caso aplica debido a la cantidad baja de datos (4 datos).

Tabla 32: Validación Test Kolmogorov-Smirnov para ventilador aire combustión

KOLMOGOROV SMIRNOV	
Max calc	0,14927686
Alpha	0,05
Max tabla	0,624
APROBADO	

Como se ve en la Tabla 32, el ajuste se valida debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Max calc = 0,149) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov-Smirnov (Max tabla = 0,624).

4.4.2 Sistema Kick-Off

En la Figura 46 se muestra el ajuste lineal realizado que posteriormente da origen a la estimación de parámetros de Weibull y el cálculo de la confiabilidad.

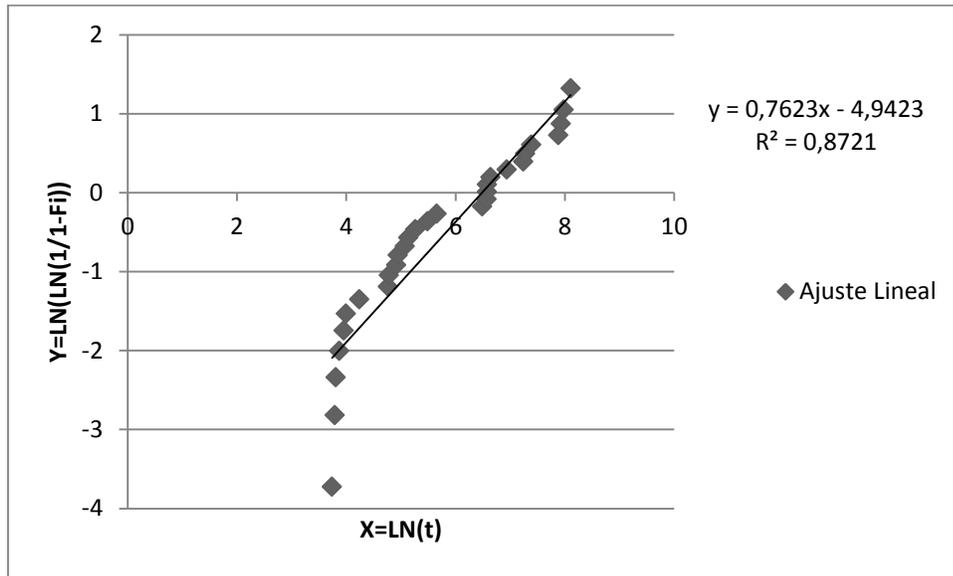


Figura 46: Ajuste lineal para datos de sistema Kick-Off

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en el coeficiente de correlación (R^2). Este valor es bastante bajo. Sin embargo, la validez de la estimación de parámetros de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los parámetros obtenidos son:

Tabla 33: Parámetros de Weibull para sistema Kick-Off

$\beta = 1,2$
$\Upsilon = 0$
$\eta = 507, 113$

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo (Ver Figura 47).

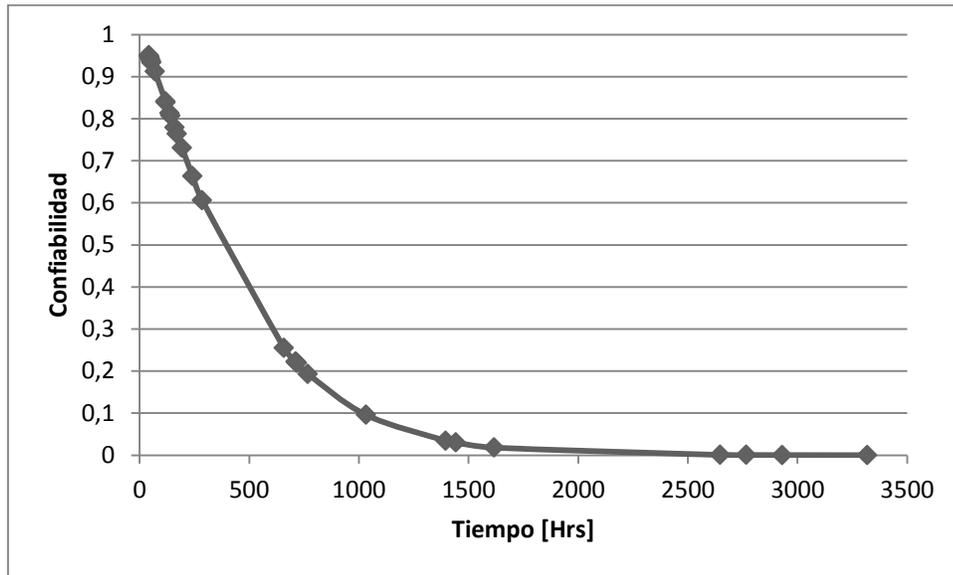


Figura 47: Confiabilidad para sistema Kick-Off

Luego, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de validación Kolmogorov-Smirnov. En este caso aplica debido a la cantidad baja de datos (29 datos).

Tabla 34: Test de validación Kolmogorov-Smirnov para sistema Kick-Off

KOLMOGOROV SMIRNOV	
Max calc	0,039
Alpha	0,050
Max tabla	0,240
APROBADO	

Como se ve en la Tabla 34, el ajuste se valida debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Max calc = 0,039) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov-Smirnov (Max tabla = 0,240).

4.4.3 Lubricación Tren de Desbaste

En la Figura 48 se muestra el ajuste lineal realizado que posteriormente da origen a la estimación de parámetros de Weibull y el cálculo de la confiabilidad.

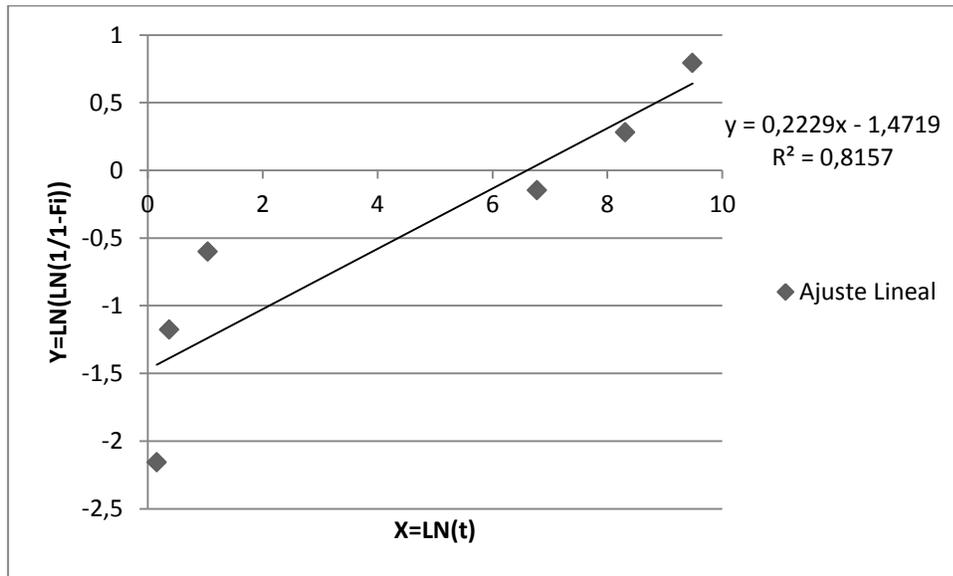


Figura 48: Ajuste lineal para los datos de sistema de lubricación tren de desbaste

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en el coeficiente de correlación (R^2). Este valor es bastante bajo. Sin embargo, la validez de la estimación de parámetros de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los parámetros obtenidos son:

Tabla 35: Parámetros de Weibull para lubricación tren de desbaste

$\beta = 1,6$
$\gamma = 0$
$\eta = 958,959$

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo (Ver Figura 49).

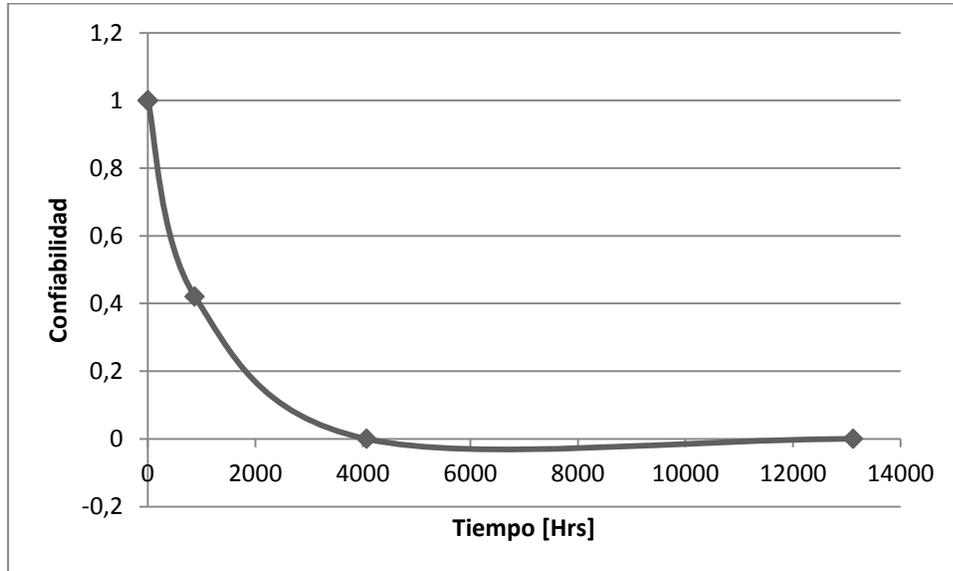


Figura 49: Confiabilidad para lubricación de desgaste

Luego, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. En este caso aplica debido a la baja cantidad de datos (6 datos aproximadamente). La Tabla 36 muestra el desarrollo del test de validación.

Tabla 36: Test de validación Kolmogorov-Smirnov

KOLMOGOROV-SMIRNOV	
Max calc	0,178
Alpha	0,050
Max tabla	0,521
APROBADO	

Como se ve en la Tabla 36, el ajuste se valida debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Max calc = 0,178) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov-Smirnov (Max tabla = 0,521).

4.4.4 Lubricación Tren Medio

En la Figura 50 se muestra el ajuste lineal realizado que posteriormente da origen a la estimación de parámetros de Weibull y el cálculo de la confiabilidad.

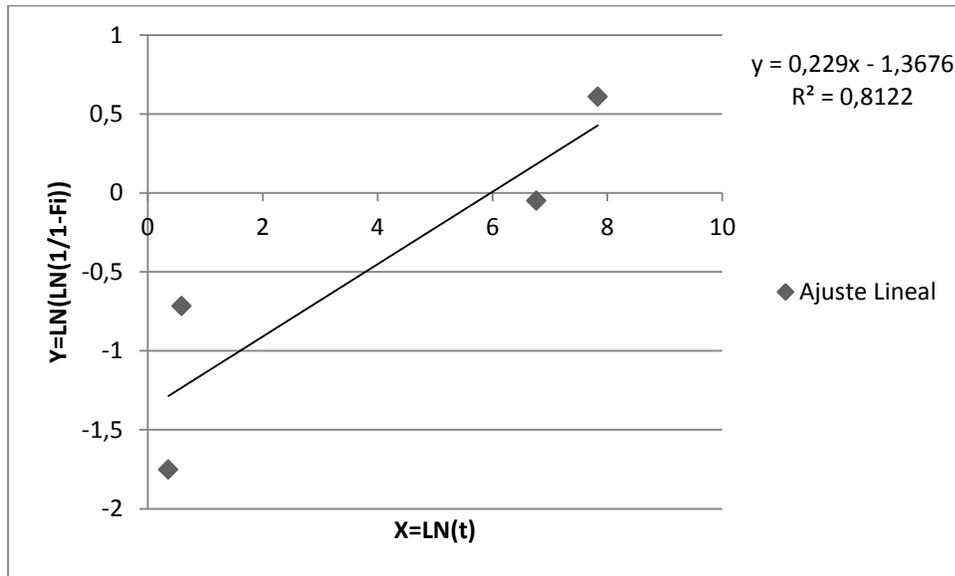


Figura 50: Ajuste lineal para datos de lubricación del Tren Medio

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en el coeficiente de correlación (R^2). Este valor es bastante bajo. Sin embargo, la validez de la estimación de parámetros de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los parámetros obtenidos son:

Tabla 37: Parámetros de Weibull para lubricación del Tren Medio

$\beta = 2,1$
$\gamma = 0,3$
$\eta = 850$

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo (Ver Figura 51).

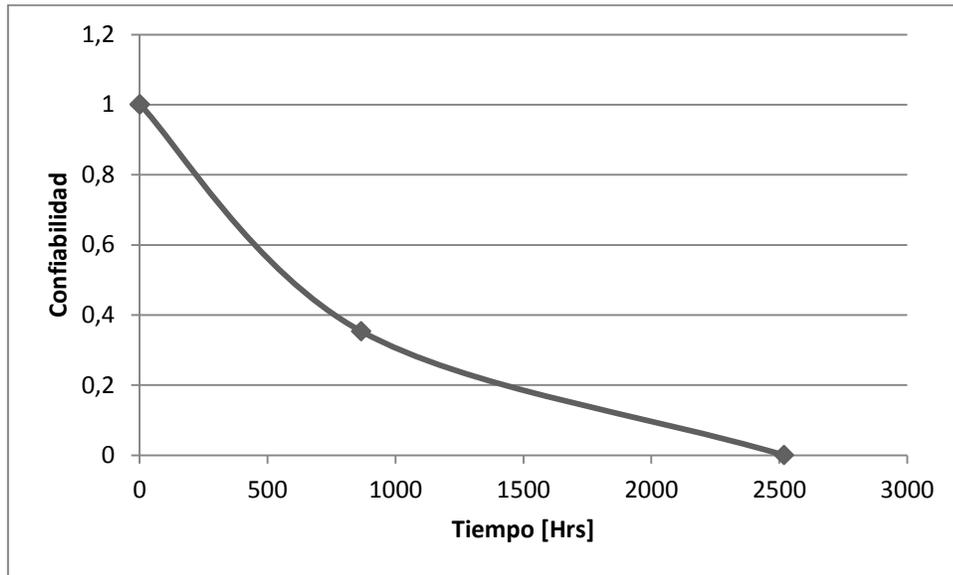


Figura 51: Confiabilidad para lubricación del Tren Medio

Luego, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. En este caso aplica debido a la baja cantidad de datos (3 datos aproximadamente). La Tabla 38 muestra el desarrollo del test de validación.

Tabla 38: Test de validación Kolmogorov-Smirnov

KOLMOGOROV SMIRNOV	
Max calc	0,149
Alpha	0,050
Max tabla	0,624
APROBADO	

Como se ve en la Tabla 38, el ajuste se valida debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Max calc = 0,149) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov-Smirnov (Max tabla = 0,624).

4.4.5 Motor del Monoblock

En la Figura 52 se muestra el ajuste lineal realizado que posteriormente da origen a la estimación de parámetros de Weibull y el cálculo de la confiabilidad.

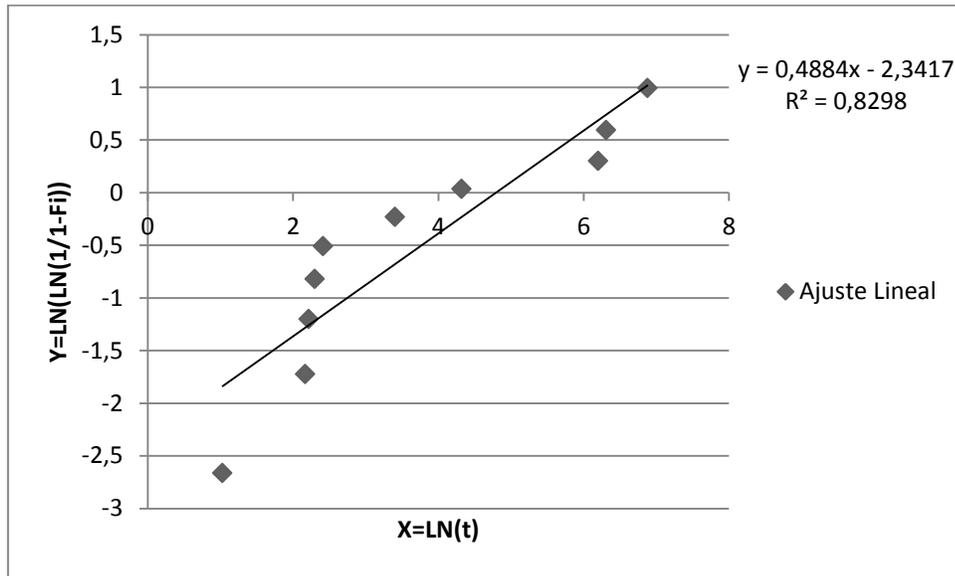


Figura 52: Ajuste lineal para datos Motor del Monoblock

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en el coeficiente de correlación (R^2). Este valor es bastante aceptable. En todo caso, la validez de la estimación de parámetros de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los parámetros obtenidos son:

Tabla 39: Parámetros de Weibull para Motor del Monoblock

$\beta = 1,27$
$\gamma = 0$
$\eta = 210$

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo (Ver Figura 53).

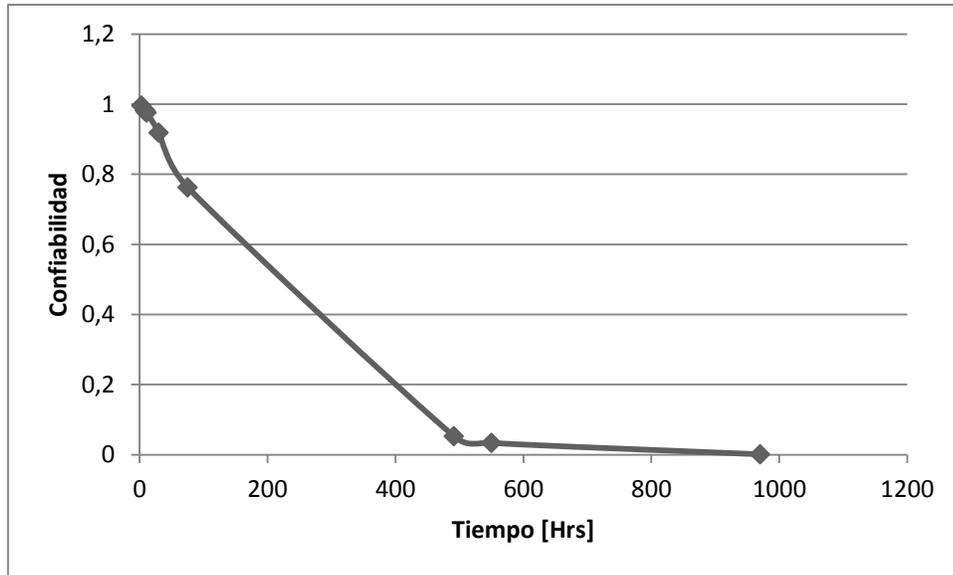


Figura 53: Confiabilidad del Motor del Monoblock

Luego, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. En este caso aplica debido a la baja cantidad de datos (10 datos aproximadamente). La Tabla 40 muestra el desarrollo del test de validación.

Tabla 40: Test de validación Kolmogorov-Smirnov

KOLMOGOROV SMIRNOV	
Max calc	0,218
Alpha	0,050
Max tabla	0,410
APROBADO	

Como se ve en la Tabla 40, el ajuste se valida debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Max calc = 0,218) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov-Smirnov (Max tabla = 0,410).

4.4.6 Sistema neumático del Frenacola

En la Figura 54 se muestra el ajuste lineal realizado que posteriormente da origen a la estimación de parámetros de Weibull y el cálculo de la confiabilidad.

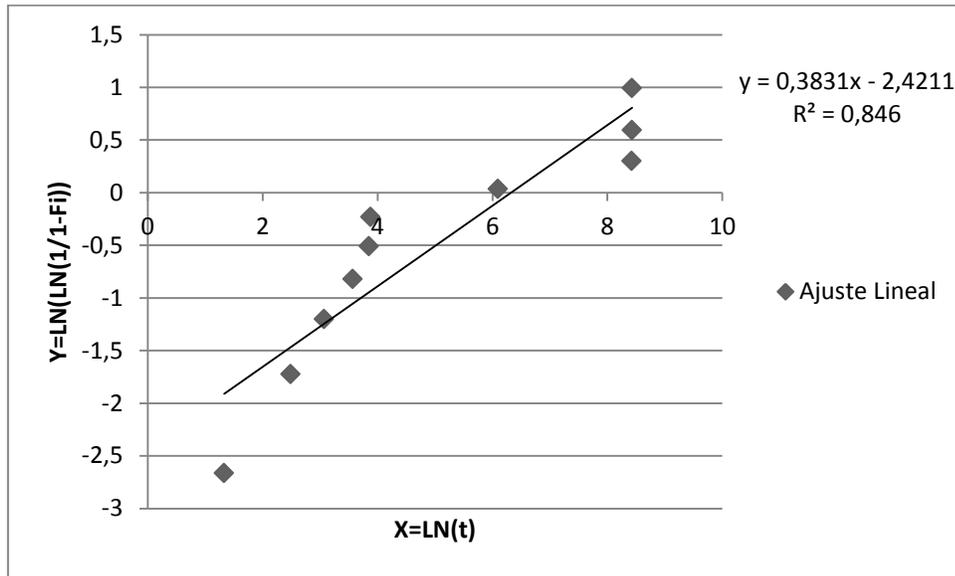


Figura 54: Ajuste lineal datos sistema neumático Frenacola.

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en el coeficiente de correlación (R^2). Este valor es bastante bajo. Sin embargo, la validez de la estimación de parámetros de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los parámetros obtenidos son:

Tabla 41: Parámetros de Weibull para el Sistema neumático del Frenacola

$\beta = 1,02$
$\Upsilon = 0$
$\eta = 1450$

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo (Ver Figura 55).

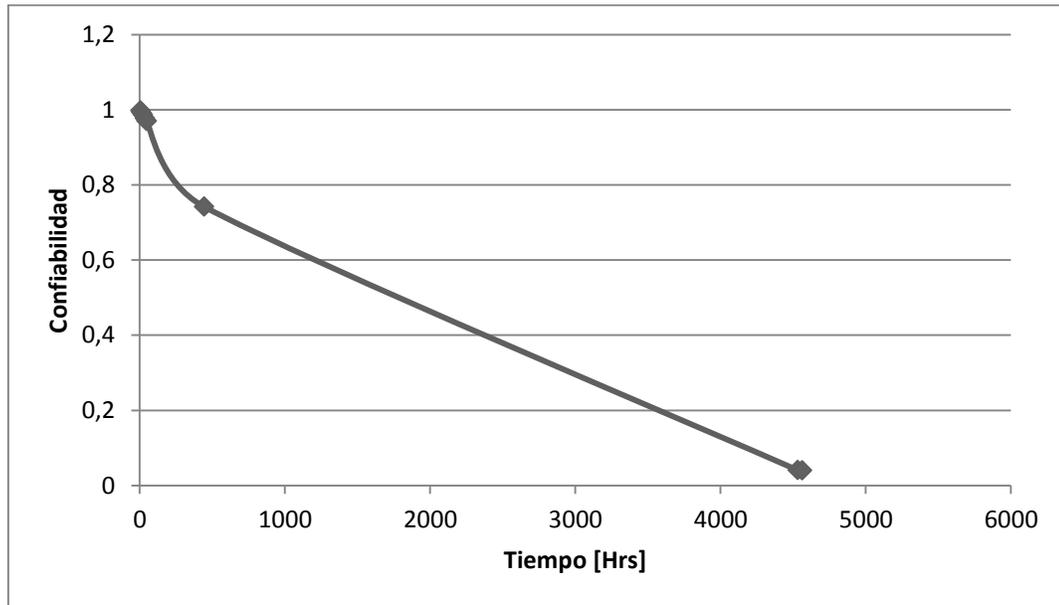


Figura 55: Confiabilidad para Sistema neumático del Frenacola

Luego, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. En este caso aplica debido a la baja cantidad de datos (10 datos aproximadamente). La Tabla 42 muestra el desarrollo del test de validación.

Tabla 42: Test de validación Kolmogorov-Smirnov

KOLMOGOROV SMIRNOV	
Max calc	0,268
Alpha	0,050
Max tabla	0,410
APROBADO	

Como se ve en la Tabla 42, el ajuste se valida debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Max calc = 0,268) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov-Smirnov (Max tabla = 0,410).

4.5 Selección de estrategia de mantenimiento

4.5.1 Ventilador de aire combustión

Los costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para este equipo crítico se resumen en la Tabla 43. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. Sin embargo, la relación “Alfa” correspondiente a costos preventivos sobre costos correctivos ha sido cuidadosamente resguardada. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 43: Costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para ventilador de aire combustión

Costos [um]		
Preventivo	Correctivo	Alfa
706.258	4.627.925	0,153
Parámetros Weibull		
Beta	Gamma	Eta
1,200	0	323,879

La curva de costo preventivo sobre costo correctivo tiene la siguiente forma (Figura 56).

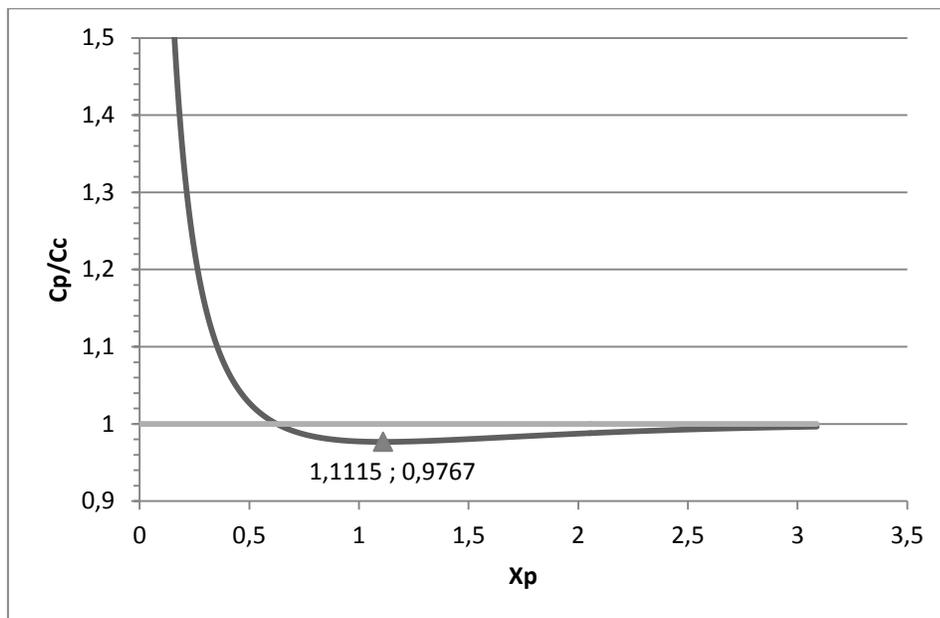


Figura 56: Modelo de costo para ventilador de aire combustión

Cabe mencionar que los ejes del gráfico presente en la Figura 56 han sido modificados para poder observar con claridad el punto mínimo obtenido.

Finalmente, considerando el punto mínimo ($C_p/C_c < 1$) se define una estrategia de mantenimiento preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 15 días.

4.5.2 Sistema Kick-Off

Los costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para este equipo crítico se resumen en la Tabla 44. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. Sin embargo, la relación “Alfa” correspondiente a costos preventivos sobre costos correctivos ha sido cuidadosamente resguardada. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 44: Costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para sistema Kick-Off

Costos [um]		
Preventivo	Correctivo	Alfa
5.465.925	18.353.498	0,298
Parámetros de Weibull		
Beta	Gamma	Eta
1,200	0	507,110

La curva de costo preventivo sobre costo correctivo tiene la siguiente forma (Figura 57).

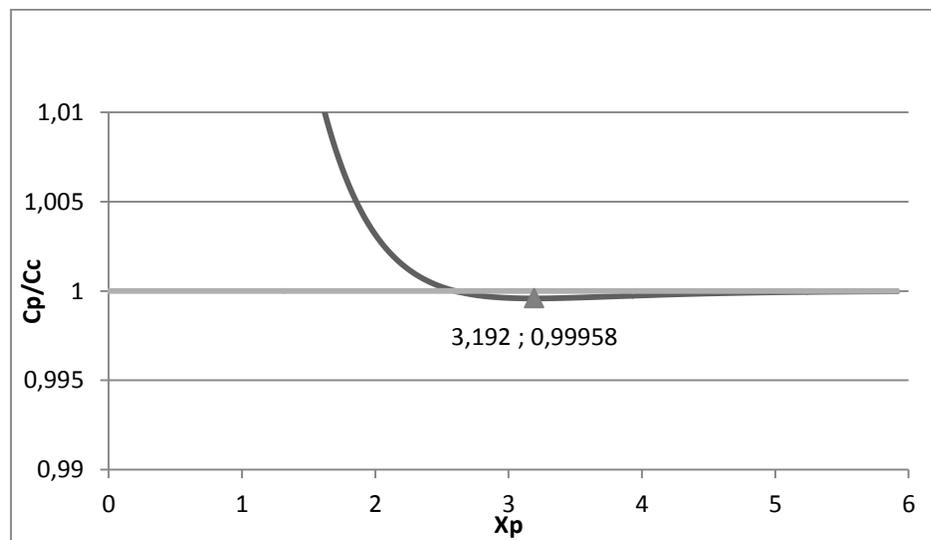


Figura 57: Modelo de costos para sistema Kick-Off

Cabe mencionar que los ejes del gráfico presente en la Figura 56 han sido modificados para poder observar con claridad el punto mínimo obtenido.

Finalmente, considerando el punto mínimo ($C_p/C_c < 1$) se define una estrategia de mantenimiento preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 67 días.

4.5.3 Lubricación Tren de Desbaste

Los costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para este equipo crítico se resumen en la Tabla 45. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. Sin embargo, la relación “Alfa” correspondiente a costos preventivos sobre costos correctivos ha sido cuidadosamente resguardada. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 45: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Lubricación Tren de Desbaste

Costos [um]		
Preventivo	Correctivo	Alfa
9.330.609	16.770.709	0,556
Parámetros de Weibull		
Beta	Gamma	Eta
1,600	0	958,959

La curva de costo preventivo sobre costo correctivo tiene la siguiente forma (Figura 58).

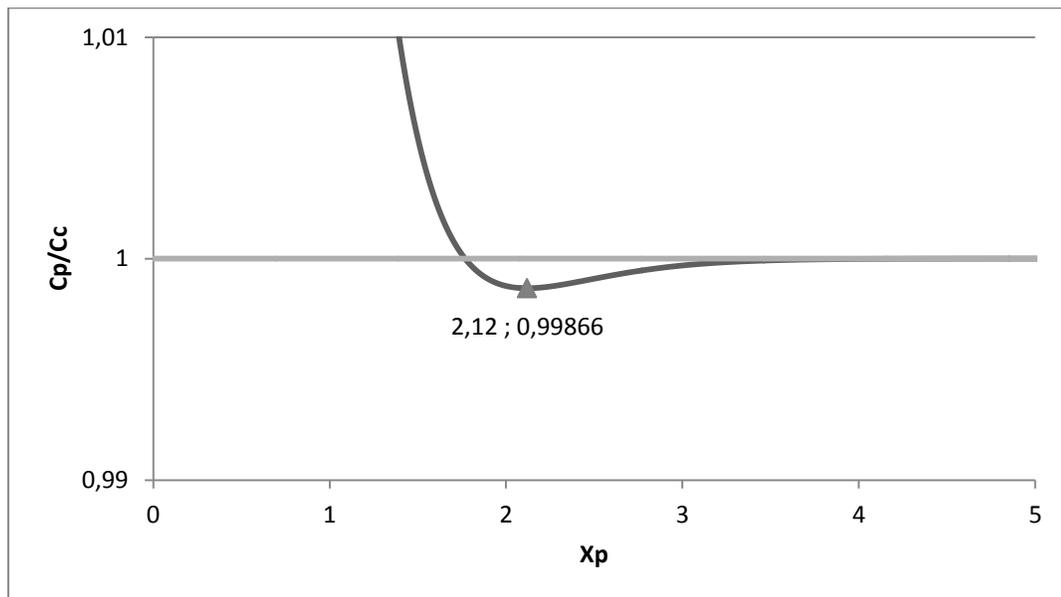


Figura 58: Modelo de costos para Lubricación de Tren de Desbaste

Cabe mencionar que los ejes del gráfico presente en la Figura 58 han sido modificados para poder observar con claridad el punto mínimo obtenido.

Finalmente, considerando el punto mínimo ($C_p/C_c < 1$) se define una estrategia de mantenimiento preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 85 días.

4.5.4 Lubricación Tren Medio

Los costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para este equipo crítico se resumen en la Tabla 46. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. Sin embargo, la relación “Alfa” correspondiente a costos preventivos sobre costos correctivos ha sido cuidadosamente resguardada. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 46: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Lubricación Tren Medio

Costos [um]		
Preventivo	Correctivo	Alfa
7.710.208	64.672.206	1,192
Parámetros de Weibull		
Beta	Gamma	Eta
2,200	0,300	850

La curva de costo preventivo sobre costo correctivo tiene la siguiente forma (Figura 59).

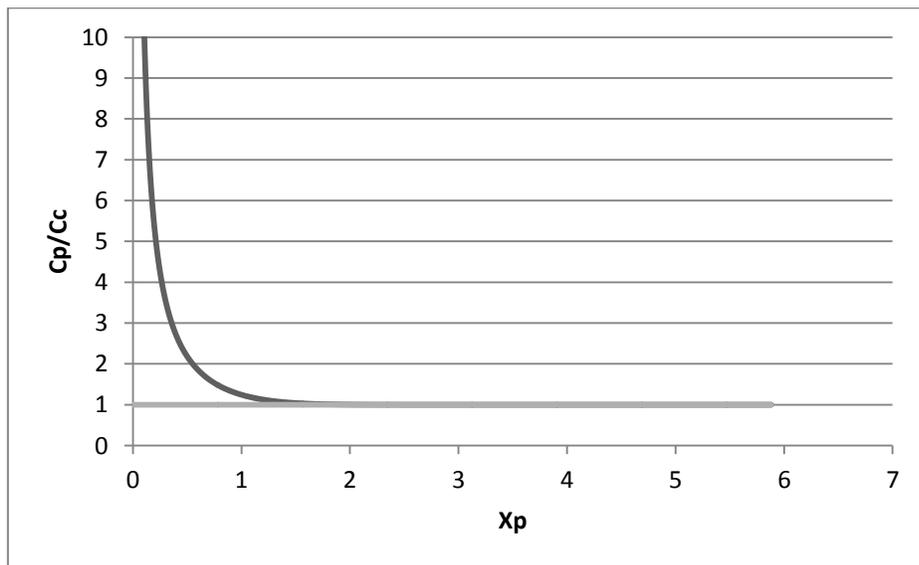


Figura 59: Modelo de costos para Lubricación Tren Medio

Cabe mencionar que los ejes del gráfico presente en la Figura 59 han sido modificados para poder observar con claridad el punto mínimo obtenido.

Finalmente, considerando el punto mínimo (Asintótico a $Cp/Cc=1$) la selección de estrategia no es concluyente.

4.5.5 Motor del Monoblock

Los costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para este equipo crítico se resumen en la Tabla 47. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. Sin embargo, la relación “Alfa” correspondiente a costos preventivos sobre costos correctivos ha sido cuidadosamente resguardada. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 47: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Motor del Monoblock

Costos [um]		
Preventivo	Correctivo	Alfa
8.920.980	23.190.495	0,385
Parámetros de Weibull		
Beta	Gamma	Eta
1,270	0	210

La curva de costo preventivo sobre costo correctivo tiene la siguiente forma (Figura 60).

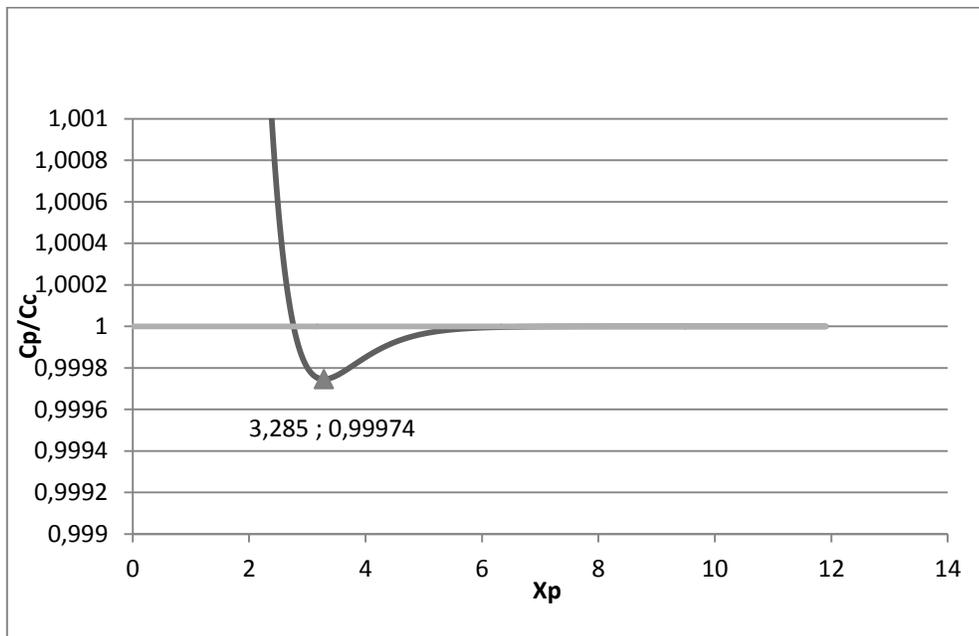


Figura 60: Modelo de costos para Motor del Monoblock

Cabe mencionar que los ejes del gráfico presente en la Figura 60 han sido modificados para poder observar con claridad el punto mínimo obtenido.

Finalmente, considerando el punto mínimo ($C_p/C_c < 1$) se define una estrategia de mantenimiento preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 29 días.

4.5.6 Sistema neumático del Frenacola

Los costos preventivos, costos correctivos y parámetros de Weibull para este equipo crítico se resumen en la Tabla 48. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. Sin embargo, la relación “Alfa” correspondiente a costos preventivos sobre costos correctivos ha sido cuidadosamente resguardada. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 48: Costo preventivo, costo correctivo y parámetros de Weibull para Sistema neumático del Frenacola

Costos [um]		
Preventivo	Correctivo	Alfa
543.640	22.819.360	0,024
Parámetros de Weibull		
Beta	Gamma	Eta
1,020	0	1.450

La curva de costo preventivo sobre costo correctivo tiene la siguiente forma (Figura 61).

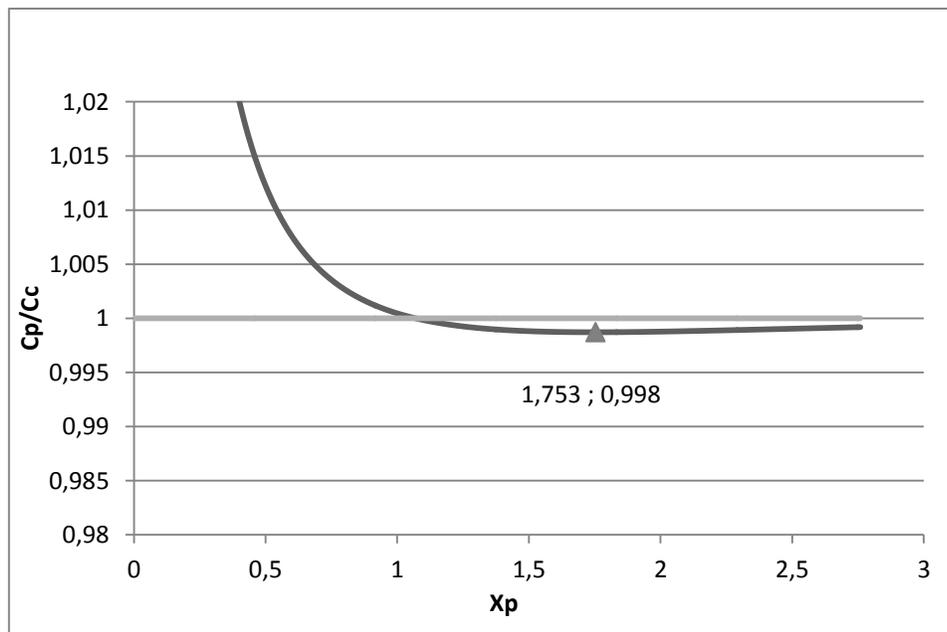


Figura 61: Modelo de costos para Sistema neumático del Frenacola

Cabe mencionar que los ejes del gráfico presente en la Figura 61 han sido modificados para poder observar con claridad el punto mínimo obtenido.

Finalmente, considerando el punto mínimo ($C_p/C_c < 1$) se define una estrategia de mantenimiento preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 106 días.

4.6 Frecuencia de inspecciones

4.6.1 Ventilador de aire combustión

A continuación se presentan los parámetros utilizados en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección y los resultados pertinentes para el ventilador aire combustión. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 49: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para ventilador aire combustión

Parámetro	Valor
MTTR [hrs/falla]	2,300
MTTI [hras/falla]	2,300
Costo a falla [um]	1.440.552
Costo correctivo [um]	455.045
Costo inspección [um]	160.662
Frecuencia inicial [#insp/hra]	0,002
Frecuencia óptima [#insp/mes]	5,979

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se propone realizar 6 inspección mensuales.

4.6.2 Sistema Kick-Off

A continuación se presentan los parámetros utilizados en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección y los resultados pertinentes para el Sistema Kick-Off. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 50: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para Sistema Kick-Off

Parámetro	Valor
MTTR [hrs/falla]	5,360
MTTI [hras/falla]	5,360
Costo a falla [um]	4.725.895
Costo correctivo [um]	2.791.697
Costo inspección [um]	937.541
Frecuencia inicial [#insp/hra]	0,002
Frecuencia óptima [#insp/mes]	3,978

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se propone realizar 4 inspecciones mensuales.

4.6.3 Lubricación Tren de Desbaste

A continuación se presentan los parámetros utilizados en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección y los resultados pertinentes para el sistema de Lubricación del Tren de Desbaste. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 51: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para Lubricación Tren de Desbaste

Parámetro	Valor
MTTR [hrs/falla]	0,408
MTTI [hras/falla]	0,408
Costo a falla [um]	4.498.053
Costo correctivo [um]	2.371.229
Costo inspección [um]	797.047
Frecuencia inicial [#insp/hra]	0,003
Frecuencia óptima [#insp/mes]	4,104

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se propone realizar 4 inspecciones mensuales.

4.6.4 Lubricación Tren Medio

A continuación se presentan los parámetros utilizados en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección y los resultados pertinentes para el sistema de Lubricación del Tren Medio. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 52: Parámetros de cálculo y frecuencia óptima mensual para Lubricación Tren Medio

Parámetro	Valor
MTTR [hrs/falla]	0,411
MTTI [hras/falla]	0,411
Costo a falla [um]	15.412.446
Costo correctivo [um]	11.077.289
Costo inspección [um]	3.715.173
Frecuencia inicial [#insp/hra]	0,008
Frecuencia óptima [#insp/mes]	6,383

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se propone realizar 6 inspecciones mensuales.

4.6.5 Motor Monoblock

A continuación se presentan los parámetros utilizados en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección y los resultados pertinentes para el Motor de Monoblock. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 53: Parámetros de cálculo y frecuencia mensual para Motor del Monoblock

Parámetro	Valor
MTTR [hrs/falla]	0,798
MTTI [hras/falla]	0,798
Costo a falla [um]	5.277.127
Costo correctivo [um]	4.221.699
Costo inspección [um]	1.415.022
Frecuencia inicial [#insp/hra]	0,007
Frecuencia óptima [#insp/mes]	10,904

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se propone realizar 11 inspecciones mensuales.

4.6.6 Sistema Neumático del Frenacola

A continuación se presentan los parámetros utilizados en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección y los resultados pertinentes para el Sistema Neumático del Frenacola. Es importante mencionar que los costos han sido modificados para mantener la confidencialidad. ([um]: Unidad monetaria arbitraria)

Tabla 54: Parámetros de cálculo y frecuencia mensual para Sistema Neumático del Frenacola

Parámetro	Valor
MTTR [hrs/falla]	0,442
MTTI [hras/falla]	0,442
Costo a falla [um]	2.498.918
Costo correctivo [um]	6.847.891
Costo inspección [um]	2.290.973
Frecuencia inicial [#insp/hra]	0,001
Frecuencia óptima [#insp/mes]	1,373

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se propone realizar 1 inspección mensual.

5 ANÁLISIS

5.1 Análisis de criticidad y definición de equipos críticos

Como se mencionó a lo largo del presente informe, para la selección de equipos críticos es necesario el desarrollo de Árboles de Falla que permitan conocer a cabalidad el proceso y los equipos en cuestión. Así como también la construcción de una Matriz de Criticidad que permita jerarquizar la importancia que posee cada equipo para el proceso productivo. En primer lugar, cabe destacar que una de las mayores dificultades a la hora de seleccionar los equipos críticos es la objetividad e imparcialidad en la definición. Por otra parte, lograr conocer cabalmente el proceso productivo, los equipos asociados y sus cargas de trabajo representa otro gran escollo a sortear.

Para solucionar el problema asociado al conocimiento de la planta y sus equipos se generan los distintos árboles de falla (Ver Sección “4.1 Árboles de Falla”). Estos esquemas permiten conocer el equipo en cuestión, sus componentes, sus posibles modos de falla y el lugar que toma en el proceso productivo. En este documento se realizaron Árboles de Falla en una escala que bien podría ser considerada como “Macro” (Ver Sección “3.2.1 Árboles de falla”). La razón es bastante lógica y obedece básicamente a la optimización del recurso “Tiempo”. Sin embargo, y a pesar de tener un carácter general, el desarrollo de los árboles de falla para las distintas zonas de la planta de laminación ha otorgado información muy relevante y ha permitido aprehender el proceso en su totalidad. Esto es de gran provecho a la hora de generar una matriz de criticidad y la posterior definición de los equipos críticos. De este modo, el primer problema a solucionar en el desarrollo de este trabajo de título ha sido superado de manera exitosa y en un corto tiempo.

El problema asociado a la definición objetiva de los equipos críticos es muy difícil de solucionar. Sin embargo, se ha intentado soslayarlo lo más posible. Para ello se generaron los cinco factores, concernientes a distintos aspectos de la producción (Definidos en Sección “3.2.2 Matriz de criticidad”). Estos factores son: Frecuencia de falla, factor operacional, factor de flexibilidad operacional, costo asociado a la detención y factor de seguridad, medio ambiente e higiene. Como se mencionó anteriormente en este documento, los factores se aplicaron en dos modelos. El primero es el modelo propuesto por la consultora inglesa “The Woodhouse Partnership limited”, mientras que el segundo modelo se basa en la suma ponderada de los factores previamente expuestos en base a la experiencia y objetivos buscados por la planta de laminación.

Luego de realizados ambos modelos es posible contrastarlos. Si se observa con detención las tablas de comparación entre los equipos críticos obtenidos para cada modelo (Ver Tablas 10-13-16-19-22), es posible inferir que el Modelo 2 entrega una mayor cantidad de equipos críticos. Es más, el conjunto de equipos críticos resultantes del primer modelo representa un subconjunto de los equipos entregados por el segundo modelo. Por otra parte, el Modelo 2 entrega resultados mucho más cercanos a la realidad de la planta. Es decir, se acerca más a los equipos críticos esperados por los encargados de la planta. En este punto surge la siguiente duda: ¿Es posible que los modelos no arrojen todos los equipos críticos esperados? La respuesta es “Si, es posible”. De hecho, un equipo definido como crítico para mantenedores de la planta y para la operación es el Reductor de los motores de las Cajas de Laminación. Sin embargo, estos equipos no están considerados en el análisis puesto que desde la puesta en marcha hasta la fecha no han ocurrido fallas. Considerando el objetivo de optimizar el plan de mantenimiento existente no tiene sentido

incluirlos en el estudio. Por tanto se propone estudiar estos casos de manera paralela en un futuro análisis.

Volviendo al tema central, el Modelo 2 resulta ser más completo y verosímil que el Modelo 1. Por esta razón, se decide seleccionar los equipos críticos para el resto del estudio basado en el Modelo 2. Siguiendo este tenor, los encargados de mantenimiento de la planta definieron cinco equipos críticos con los cuales trabajar, a saber: Ventilador Aire combustión en la zona Horno, Sistema Kick-Off en zona Horno, Sistema de lubricación en Tren de Desbaste y Tren Medio de laminación, Motor del Monoblock y Sistema neumático del Frenacola. Esta selección asume que el sistema de lubricación del Tren de Desbaste y Tren Medio de laminación es idéntico. Sin embargo, ambos sistemas de lubricación son muy similares en cuanto a configuración y equipos, pero distintos en cuanto a cargas de trabajo y a fallas documentadas en el histórico de fallas. Por esta razón, se decide trabajar los sistemas de lubricación por separado aunque esto revista mayor trabajo.

Los, ahora seis, equipos críticos seleccionados posteriormente son expuestos a diversos estudios para generar el plan de mantenimiento.

5.2 FMECA

Como se mencionó en la Sección “2.2.2 FMECA” los FMECA permiten un estudio acabado de los equipos, entregando información relevante sobre las funciones esperadas, las fallas funcionales, modos de fallas y sus efectos. Debido a su nivel de detalle y a su extensión se ha decidido generar análisis de FMECA sólo para los equipos críticos seleccionados.

Entonces, como es de esperar, es necesario un gran conocimiento sobre el equipo, su funcionamiento y su mantenimiento. Por esta razón, los FMECA se han desarrollado en conjunto con los mantenedores directos de cada equipo (Encargados mecánicos y eléctricos de cada equipo).

Uno de los puntos positivos que entrega el FMECA es que permite visualizar o identificar modos de fallas diferentes a los que son entregados por los históricos de falla. Esto debido a que los históricos sólo entrega los modos de falla que han presentado problemas en un horizonte temporal definido. En este contexto, el FMECA es muy valioso para poder visualizar en conjunto el equipo en cuanto a su mantenimiento. De acuerdo a los efectos de los modos de falla es posible definir tareas de mantenimiento tanto correctivo como proactivo. Esto podría generar un mejor funcionamiento de los equipos y un alargamiento en su vida útil.

5.3 Estimación de parámetros de Weibull

Existen diversos modelos que nos permiten conocer el comportamiento de la confiabilidad de un equipo en el tiempo. En este caso se utiliza el modelo de Weibull debido a su gran flexibilidad y a la facilidad de aplicación.

Los resultados obtenidos corresponden a lo esperado. Es decir, la curva de la bañera para cada equipo posee un comportamiento típico de la etapa de infancia en la cual la confiabilidad desciende rápidamente conforme avanzan el tiempo de utilización hasta alcanzar una etapa constante (Madurez). Esto puede observarse fácilmente en las Figuras 45-47-49-51-53-55. Este comportamiento tiene correlación directa con el parámetro “Beta (β)” o “De forma” obtenido para cada equipo ($\beta > 1$. Ver Tablas 31-33-35-37-39-41). La obtención de parámetros Beta del mismo carácter para cada equipo (mayores que uno) es muy importante, debido a que fueron instalados en el mismo instante y tienen períodos de funcionamiento muy similares. Por otra parte, el parámetro “Eta (η)” o “De escala” presenta valores del orden de los MTTF calculados para cada equipo, lo cual concuerda con la teoría subyacente. En cuanto al parámetro “Gamma (γ)” o “De inicio” es posible mencionar que se encuentra muy cercano a cero para cada equipo, lo que indica que la vida de los equipos se inicia en el momento en que comienza el horizonte temporal.

Cabe destacar que los datos utilizados para estimar los parámetros de Weibull corresponden a los presentes en el histórico de falla facilitado por los encargados de mantenimiento de la planta. A la hora de utilizar los datos y calcular los valores MTTF se encuentran errores en los históricos. Si bien la empresa cuenta con un sistema adecuado para el registro de las fallas ocurridas, éste no se implementa como corresponde. Existen vicios en el registro de fallas de parte de los encargados de registrarlas. Esto genera una distorsión en los datos relacionado con la cantidad de fallas y tiempos de detención. El vicio antes mencionado se presenta cuando se genera una falla en el equipo (la cual genera una determinada alerta en el sistema de control automático). Esta falla detiene al equipo, pero los operadores intentan volver a producir inmediatamente obviando la falla. Esto produce presencia reiterada de un mismo modo de falla en un corto tiempo, el cual puede ser incluso de unos pocos minutos. Luego de notar el carácter fútil de los intentos de reanudación del proceso se decide corregir la falla de manera adecuada. Por lo tanto, al considerar los tiempos MTTF para el análisis de Weibull se tuvo especial cuidado en estos casos, eliminando los datos erróneos.

En cuanto al método utilizado para generar la estimación de parámetros de Weibull es posible mencionar que el ajuste lineal desarrollado para generar la primera iteración de la optimización entrega coeficientes de correlación muy bajos (Ver Figuras 44-46-48-50-52-54). Esto tiene su explicación en lo antes señalado, es decir, en los errores a la hora de registrar los datos en el sistema computacional de la planta. El hecho de tener los coeficientes de correlación muy bajos sólo tiene implicancia en una primera iteración, la cual puede ser distante de la realidad. Sin embargo, este problema pierde sentido al generar las iteraciones sucesivas. Muestra de ello es que cada una de las estimaciones de parámetros aprobó su correspondiente Test probabilístico (Ver Tablas 32-34-36-38-40-42).

A pesar de obtener valores ajustados a la teoría, se debe tener cuidado a la hora de interpretar los datos y, más aún, a la hora de aplicarlos en los siguientes análisis. Esto debido a los problemas a

la hora de registrar las fallas en los históricos de falla, falta de profundidad en los modos de falla y errores de designación de modo de falla causante de una falla particular en el sistema.

5.4 Selección de estrategia de mantenimiento

Al observar los resultados obtenidos para la selección de estrategia de mantenimiento de cada equipo crítico, es posible observar el tipo de mantenimiento óptimo y el intervalo de tiempo entre intervenciones preventivas (Ver Sección “4.5 Selección de estrategia de mantenimiento”).

La estrategia de mantenimiento definida para todos los equipos es de tipo preventivo, con excepción del Sistema de lubricación del Tren Medio que presenta un mantenimiento correctivo. Para los equipos con estrategias de mantenimiento preventivo los tiempos entre intervención parecen ser bastante razonables. Sin embargo, al observar los gráficos de Costo global de mantenimiento preventivo sobre costo global de mantenimiento correctivo versus el parámetro X_p se pueden distinguir mínimos muy cercanos a uno (Ver Figuras 56-57-58-60-61).

El problema radica en que al ser valores muy cercanos a uno (Algunos difieren sólo en la diezmilésima) no es posible concluir con propiedad si la definición de la estrategia de mantenimiento encontrada es adecuada o si se trata de un error en el método utilizado. En este aspecto, es posible mencionar que la metodología utilizada es la presente en la bibliografía (Ver Sección “2.5 Selección de estrategias de mantenimiento”) y aplicada en la industria. Entonces, es natural cuestionar la forma en la que se aplicó el método. Vale decir, la validez de los datos utilizados.

Si analizamos los parámetros necesarios para lograr la selección de estrategia de mantenimiento son necesarios los parámetros de Weibull y los costos de intervención correctiva y preventiva. En cuanto a los parámetros de Weibull ya se presentaron los problemas encontrados a la hora de llevar a cabo la estimación. Sin embargo, nada se ha mencionado en cuanto a la validez de los costos utilizados en la selección de estrategia. Es importante señalar que los datos fueron entregados por los encargados de mantenimiento de la planta y obtenidos por medio del sistema computacional de registro de mantenimiento.

Al analizar los datos de costos sobre mantenimiento preventivo y correctivo entregados por la empresa es posible notar la falta de profundidad del registro y la asignación deficiente de los costos asociados. Luego, para calcular los costos de intervención para cada tipo de mantenimiento en cada equipo es necesario hacer suposiciones y estimaciones que posiblemente alejen los cálculos de los valores reales.

Entonces, para poder validar los resultados obtenidos, se procede a presentar un análisis de sensibilidad en relación a los costos utilizados.

5.5 Análisis de sensibilidad de costos de mantenimiento

Como se mencionó en la sección anterior, se ha desarrollado un análisis de sensibilidad en la definición de estrategia de mantenimiento para cada equipo crítico.

Este análisis varía los costos de intervención de mantenimiento correctivo y preventivo. Estos parámetros se variaron uno a la vez y por separado.

El objetivo de este análisis es encontrar los porcentajes de error en los costos para los cuales se mantienen las decisiones sobre estrategias de mantenimiento encontradas en la Sección “4.5 Selección de estrategia de mantenimiento”.

Entonces, para los distintos equipos críticos se tienen los siguientes análisis de sensibilidad

5.5.1 Ventilador de aire combustión

En un principio, la estrategia de mantenimiento definida para este equipo fue una estrategia preventiva. Luego de variar los costos de mantenimiento correctivo, por una parte y luego los preventivos se obtiene lo siguiente:

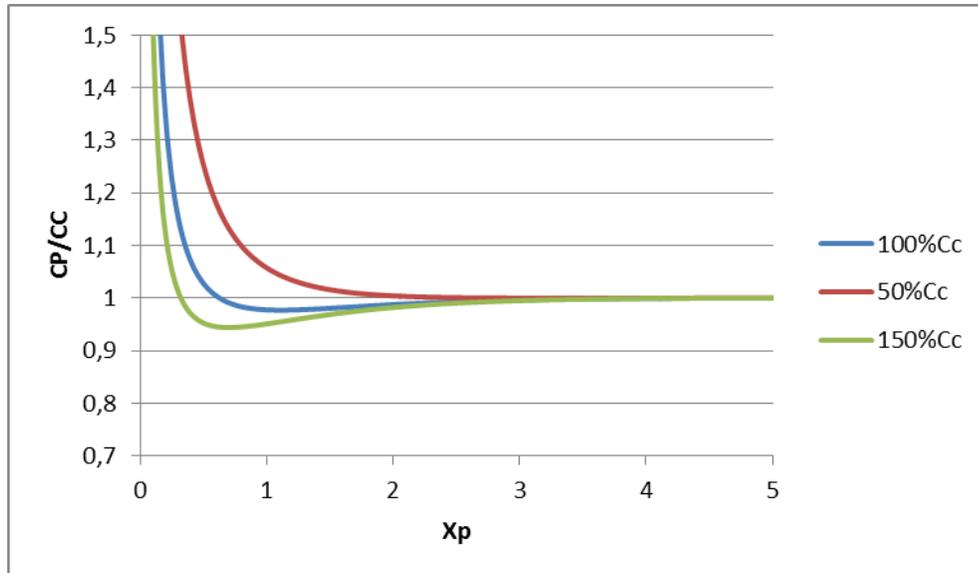


Figura 62: Variación de costos de mantenimiento correctivo para ventilador de aire combustión

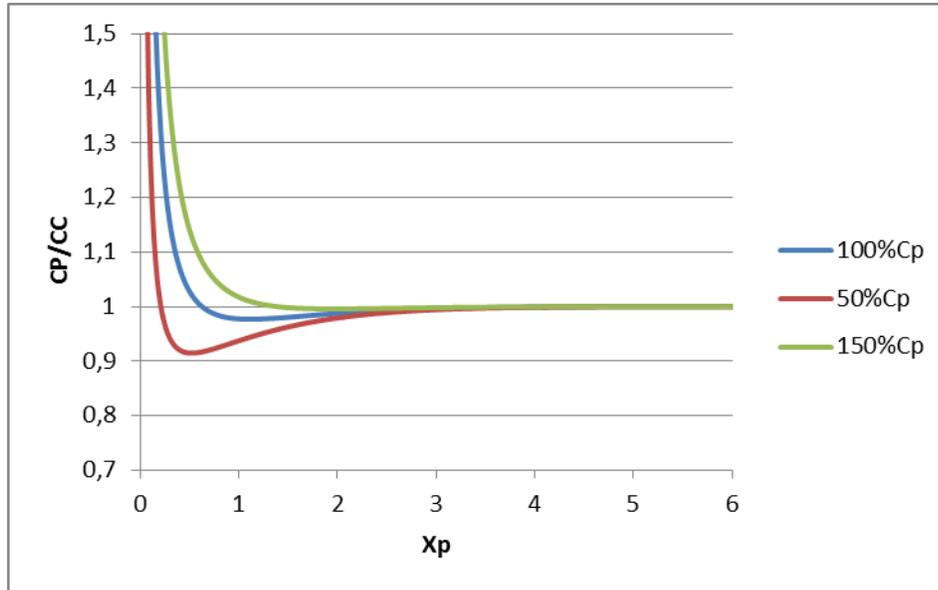


Figura 63: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Ventilador de aire combustión

Es importante aclarar que la curva “100%Cc” (Figura 62) corresponde al análisis con los costos correctivos originales entregados por la empresa. Luego las curvas “50%Cc” y “150%Cc” corresponden a los análisis con un 50% y un 150% de los costos correctivos. Es decir, se estudia el comportamiento incurriendo en un 50% de error respecto a los datos originales. En el caso de la Figura 63 aplica lo mismo, pero utilizando los costos preventivos. En la Tabla 55 se presentan los valores mínimos obtenidos, lo que permite clarificar la estrategia de mantenimiento para el equipo.

Tabla 55: Mínimos obtenidos para la variación de costos de mantenimiento correctivo y preventivo para el Ventilador de aire combustión

Sensibilidad costo correctivo		
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)
0,9768	0,9996	0,9438
Sensibilidad costo preventivo		
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)
0,9768	0,9148	0,9958

Fuente: Elaboración propia

Luego, considerando la Figura 62, Figura 63 y Tabla 55 es posible concluir que es correcto aplicar una estrategia de mantenimiento preventivo con un 50% de error.

Entonces, asumiendo el cálculo inicial, se debe generar el mantenimiento con una frecuencia de 15 días.

5.5.2 Sistema Kick-Off

En un principio, la estrategia de mantenimiento definida para este equipo fue una estrategia preventiva. Luego de variar los costos de mantenimiento correctivo, por una parte y luego los preventivos se obtiene lo siguiente:

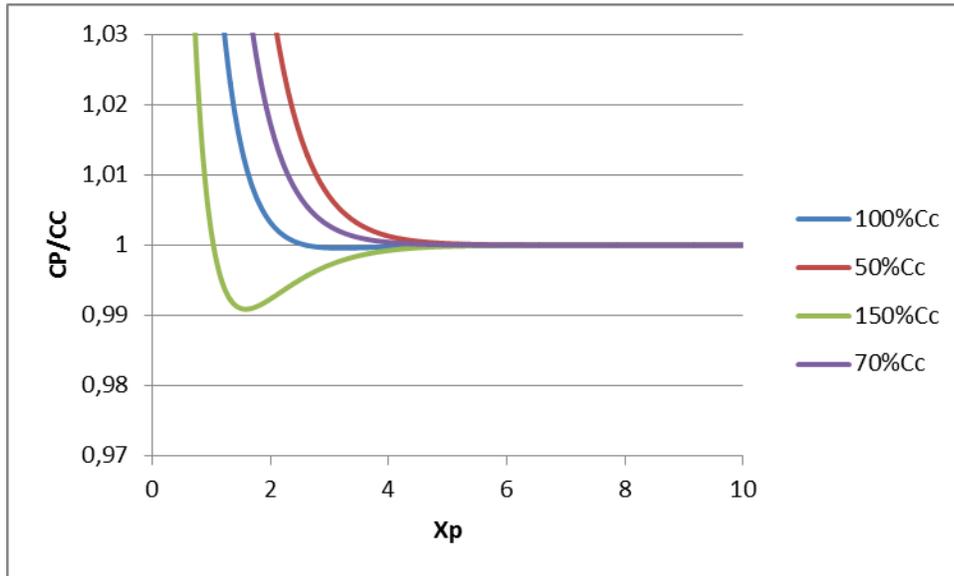


Figura 64: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Sistema Kick-Off

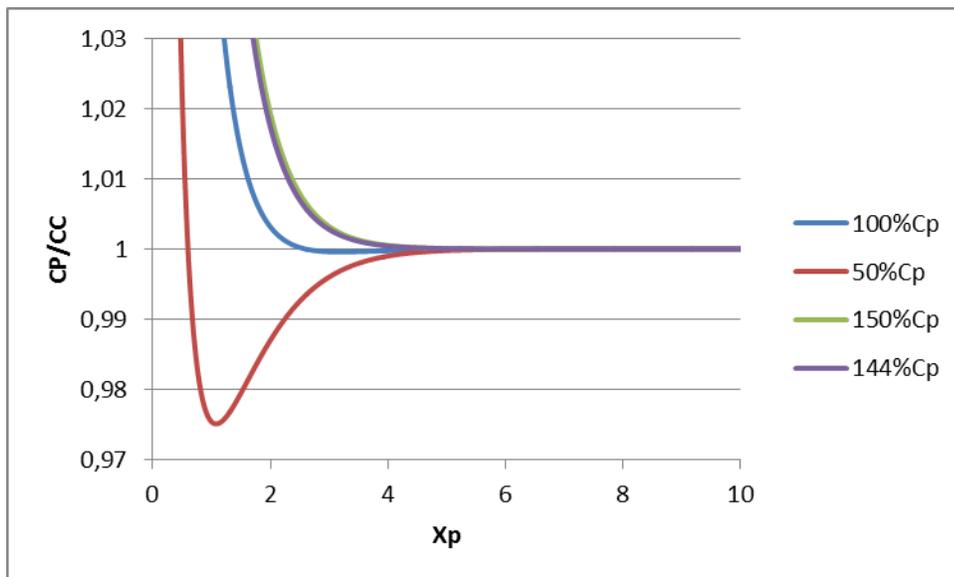


Figura 65: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Sistema Kick-Off

En la Figura 64 se presenta el mismo tipo de análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo correctivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 70% del costo correctivo se tiene estrategia preventiva.

En la Figura 65 se presenta el mismo análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo preventivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 144% del costo preventivo se tiene una estrategia preventiva.

Esto queda mejor reflejado en la Tabla 56, donde se presentan los mínimos para cada variación de costos.

Tabla 56: Mínimos obtenidos para las variaciones en costos de mantenimiento correctivo y preventivo para el Sistema Kick-Off.

Sensibilidad costo correctivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (70%)
0,9996	1	0,9908	0,9999
Sensibilidad costo preventivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (144%)
0,9996	0,9751	1	0,9999

Fuente: Elaboración propia

Luego, considerando la Figura 64, Figura 65 y la Tabla 56, con un error máximo de 30% en los costos se define una estrategia de mantenimiento preventivo.

Asumiendo el cálculo inicial realizado se debe intervenir preventivamente cada 68 días.

5.5.3 Lubricación Tren de Desbaste

En un principio, la estrategia de mantenimiento definida para este equipo fue una estrategia preventiva. Luego de variar los costos de mantenimiento correctivo, por una parte y luego los preventivos se obtiene lo siguiente:

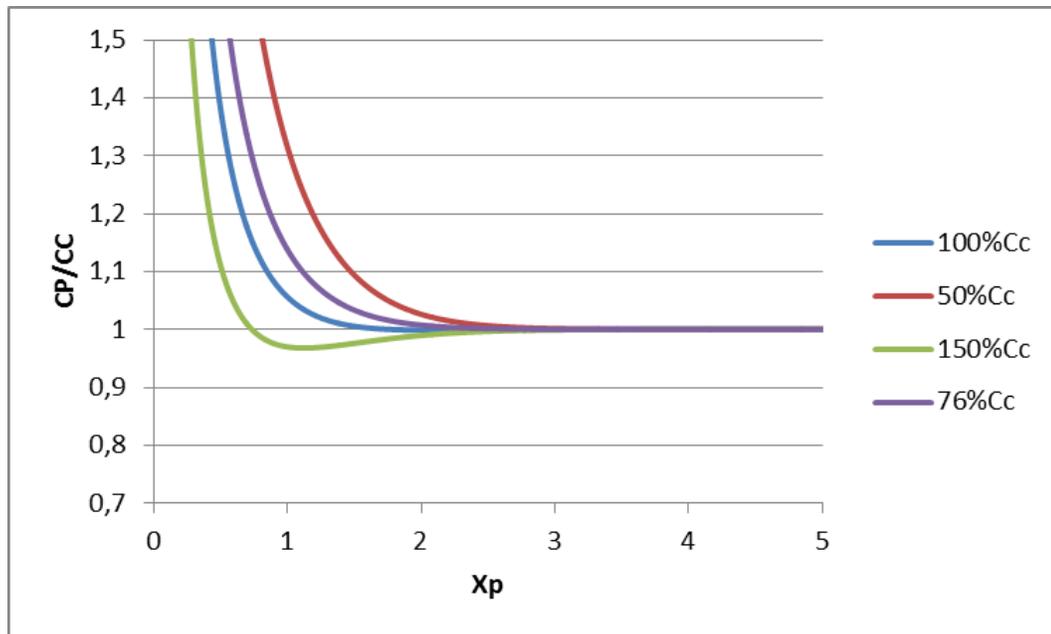


Figura 66: Variación de costos de mantenimiento correctivos para Lubricación Tren de Desbaste

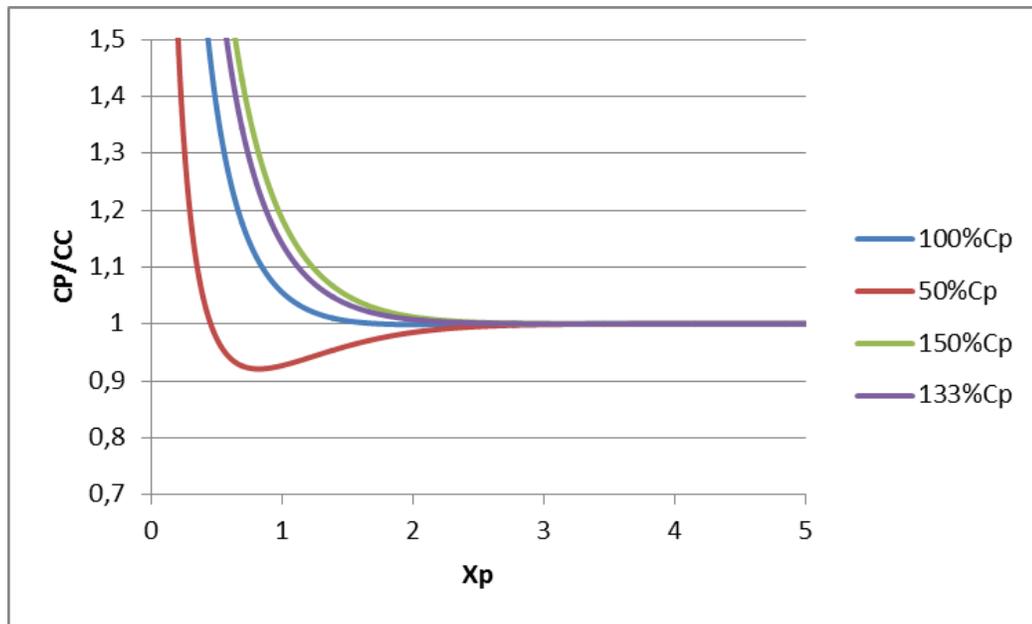


Figura 67: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Lubricación Tren de Desbaste

En la Figura 66 se presenta el mismo tipo de análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo correctivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 76% del costo correctivo se tiene estrategia preventiva.

En la Figura 67 se presenta el mismo análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo preventivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 133% del costo preventivo se tiene una estrategia preventiva.

Esto queda mejor reflejado en la Tabla 57, donde se presentan los mínimos para cada variación de costos:

Tabla 57: Mínimos obtenidos para variación de costos de mantenimiento correctivo y preventivo para Lubricación Tren de Desbaste

Sensibilidad costo correctivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (76%)
0,9996	1	0,9909	0,9999
Sensibilidad costo preventivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (133%)
0,9987	0,9209	1	0,9999

Fuente: Elaboración propia

Luego, considerando la Figura 66, Figura 67 y la Tabla 57, con un error máximo de 24% en los costos se define una estrategia de mantenimiento preventivo.

Asumiendo el cálculo inicial realizado se debe intervenir preventivamente cada 85 días.

5.5.4 Lubricación Tren Medio

En un principio, la estrategia de mantenimiento definida para este equipo fue una estrategia correctiva. Luego de variar los costos de mantenimiento correctivo, por una parte y luego los preventivos se obtiene lo siguiente:

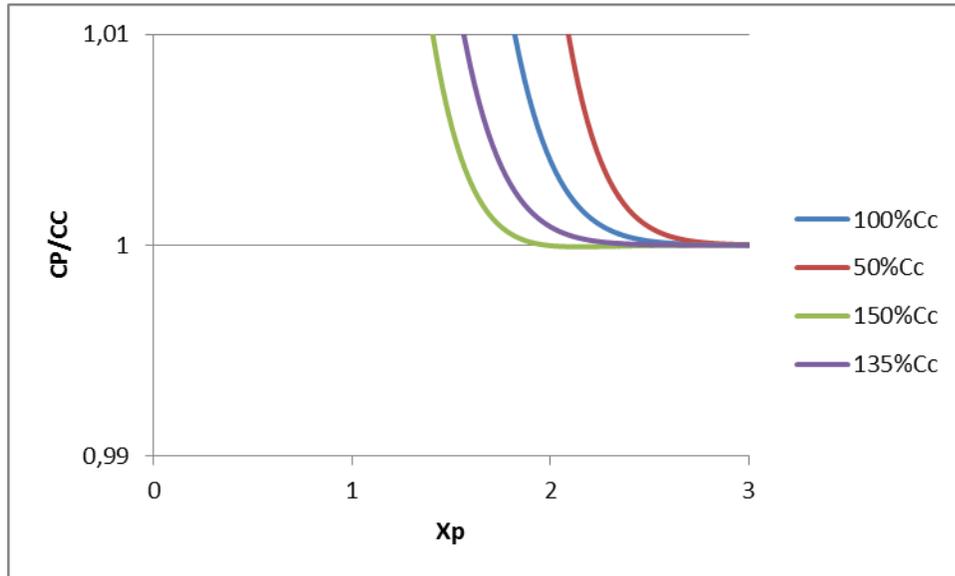


Figura 68: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Lubricación Tren Medio

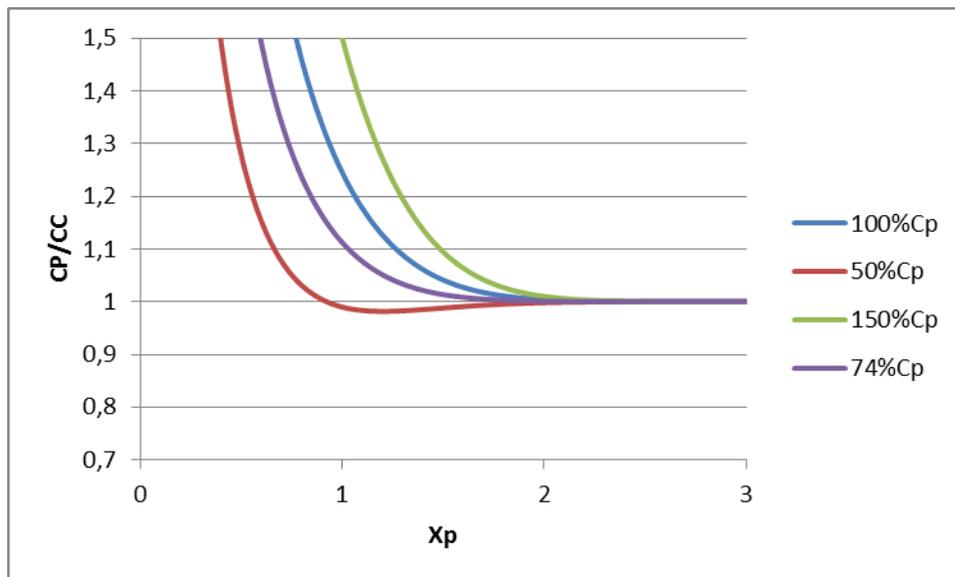


Figura 69: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Lubricación Tren Medio

En la Figura 68 se presenta el mismo tipo de análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo correctivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 135% del costo correctivo se tiene estrategia correctiva.

En la Figura 69 se presenta el mismo análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo preventivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 74% del costo preventivo se tiene una estrategia correctiva.

Esto queda mejor reflejado en la Tabla 58, donde se presentan los mínimos para cada variación de costos:

Tabla 58: Mínimos obtenidos al variar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para la Lubricación del Tren Medio

Sensibilidad costo correctivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (135%)
1,0000	1,0000	0,9992	1,0000
Sensibilidad costo preventivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (74%)
1,0000	0,9816	1,0000	1,0000

Fuente: Elaboración propia

Luego, considerando la Figura 68, Figura 69 y Tabla 58, con un error máximo de 26% en los costos se define una estrategia de mantenimiento correctivo.

5.5.5 Motor del Monoblock

En un principio, la estrategia de mantenimiento definida para este equipo fue una estrategia preventiva. Luego de variar los costos de mantenimiento correctivo, por una parte y luego los preventivos se obtiene lo siguiente:

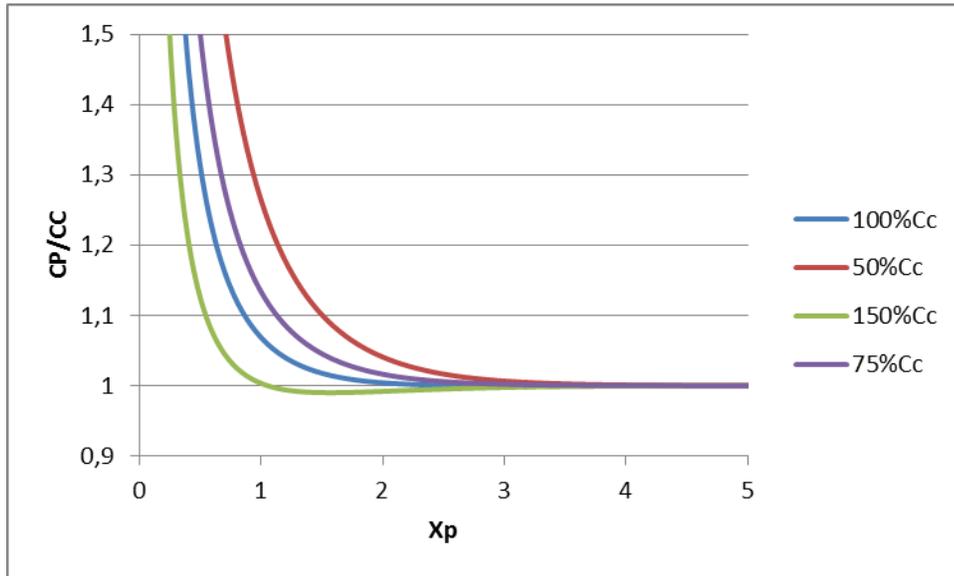


Figura 70: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Motor del Monoblock

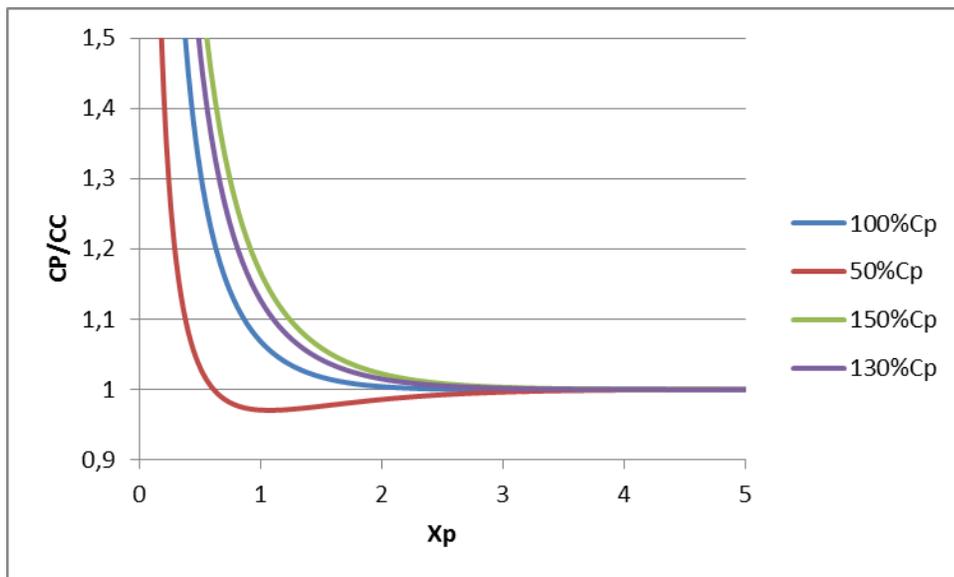


Figura 71: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Motor del Monoblock

En la Figura 70 se presenta el mismo tipo de análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo correctivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 75% del costo correctivo se tiene estrategia preventiva.

En la Figura 71 se presenta el mismo análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo preventivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 130% del costo preventivo se tiene una estrategia preventiva.

Esto queda mejor reflejado en la Tabla 59, donde se presentan los mínimos para cada variación de costos:

Tabla 59: Mínimos obtenidos al variar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para Motor del Monoblock

Sensibilidad costo correctivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (75%)
0,9997	1,0002	0,9901	0,9999
Sensibilidad costo preventivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN 130%
0,9997	0,9705	1,0001	0,9999

Fuente: Elaboración propia

Luego, considerando la Figura 70, Figura 71 y Tabla 59, con un error máximo de 25% en los costos se define una estrategia de mantenimiento preventivo.

Asumiendo el cálculo inicial realizado se debe intervenir preventivamente cada 29 días.

5.5.6 Sistema Neumático del Frenacola

En un principio, la estrategia de mantenimiento definida para este equipo fue una estrategia preventiva. Luego de variar los costos de mantenimiento correctivo, por una parte y luego los preventivos se obtiene lo siguiente:

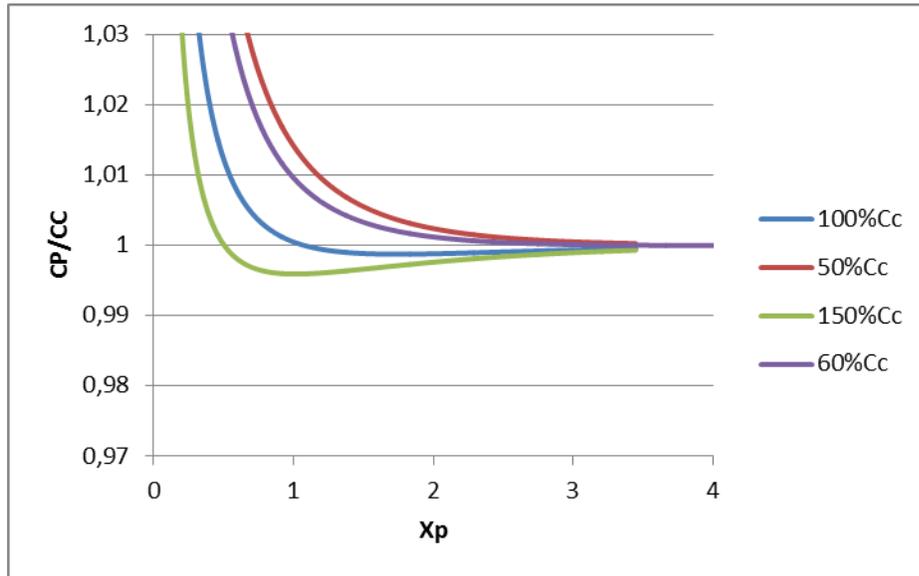


Figura 72: Variación de costos de mantenimiento correctivo para Sistema Neumático del Frenacola

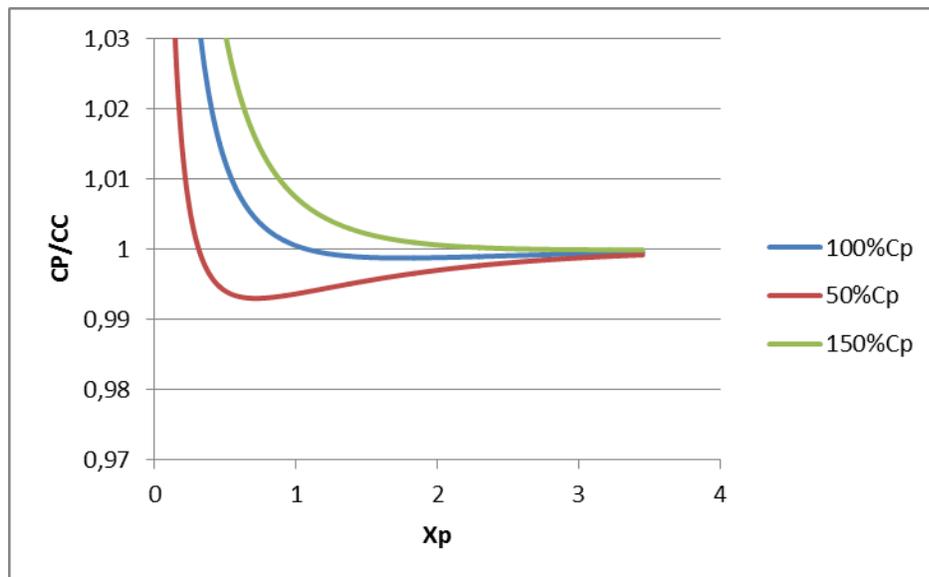


Figura 73: Variación de costos de mantenimiento preventivo para Sistema Neumático del Frenacola

En la Figura 72 se presenta el mismo tipo de análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo correctivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 60% del costo correctivo se tiene estrategia preventiva.

En la Figura 73 se presenta el mismo análisis generado para el equipo anterior. Sin embargo, se ha calculado el porcentaje de costo preventivo crítico para el cual cambia el tipo de mantenimiento. En este caso se tiene que para un porcentaje del 150% del costo preventivo se tiene una estrategia preventiva.

Esto queda mejor reflejado en la Tabla 60, donde se presentan los mínimos para cada variación de costos:

Tabla 60: Mínimos obtenidos al variar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para Sistema Neumático del Frenacola

Sensibilidad costo correctivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	MIN (60%)
0,9987	1,0002	0,9959	0,9995
Sensibilidad costo preventivo			
MIN (100%)	MIN (50%)	MIN (150%)	
0,9987	0,9929	0,9998	

Fuente: Elaboración propia

Luego, considerando la Figura 72, Figura 73 y Tabla 60, con un error máximo de 40% en los costos se define una estrategia de mantenimiento preventivo.

Asumiendo el cálculo inicial realizado se debe intervenir preventivamente cada 106 días.

5.6 Ahorro en costos de mantenimiento

La optimización a lo largo de este informe se ha realizado en pro de la minimización de los costos de mantenimiento. Resulta lógico, entonces, generar un balance que exponga los costos actuales (Sin plan optimizado) y el ahorro al aplicar el plan propuesto para cada uno de los equipos.

A continuación, en la Tabla 61 se muestran los costos iniciales para cada equipo y el ahorro calculado luego de aplicar el plan de mantenimiento optimizado. ([um]: Unidad monetaria. Se utiliza esta unidad para resguardar información de la empresa)

Tabla 61: Balance de costos actuales (Sin plan optimizado) y ahorro luego de aplicar el plan para cada equipo

Equipo crítico	Costo plan actual [um]		α	Ahorro [um]
	Preventivo	Correctivo		
Ventilador Aire combustión	706.257	4.627.925	0,153	3.921.668
Sistema Kick-Off	5.465.925	18.353.498	0,298	12.887.573
Lubricación Tren Desbaste	9.330.609	16.770.709	0,556	7.440.100
Lubricación Tren Medio	77.102.708	64.672.206	1,192	12.430.501
Motor Monoblock	8.920.980	23.190.495	0,385	14.269.515
Sistema Neumático Frenacola	543.640	22.819.360	0,024	22.275.719
Total [um]				73.225.076

Fuente: Elaboración propia

Considerando los valores de ahorro, es posible mencionar que resulta conveniente la aplicación del plan de mantenimiento propuesto en este trabajo. Sobre todo de los equipos con mayor porcentaje de ahorro, como el Sistema neumático del Frenacola. Si se considera el total de ahorro para todos los equipos (Ver Tabla 61) se tiene que el porcentaje de ahorro total corresponde aproximadamente a un 25% de los costos totales actuales en concepto de mantenimiento para los equipos críticos. Aplicando las estrategias definidas sólo a los equipos críticos seleccionados ya se incurre en un gran ahorro para la planta. No obstante, también es posible aplicarlo al resto de los equipos lo que, en un futuro cercano, podría generar un ahorro mucho mayor en conceptos de mantenimiento para la planta estudiada.

5.7 Frecuencia de inspecciones

Considerando los posibles errores en la determinación de una estrategia de mantenimiento para cada uno de los equipos críticos, se propone generar una serie de inspecciones de carácter preventivo.

Cada una de estas inspecciones corresponde a intervenciones que no incurran en la detención del equipo. Es decir, pueden ser inspecciones visuales o auditivas de los componentes de cada equipo. Como propuesta, es posible considerar las tareas asociadas a los FMECA que impliquen sólo inspecciones de los componentes. Luego de definidas estas tareas, se puede calendarizar la aplicación de éstas basándose en la frecuencia de inspecciones estimada para cada equipo. Además, estas inspecciones corresponden a una alternativa complementaria de los programas de mantenimiento actuales y la corrección de fallas ocurridas esporádicamente.

Las inspecciones son de bajo costo debido a que no detienen el equipo y a que no es necesario incurrir en repuestos o fungibles. Sólo es necesario costear las horas hombre destinadas a la inspección de los componentes seleccionados en cada equipo.

Entonces, las inspecciones representan una excelente alternativa para el sistema actual de mantenimiento en la Planta. Es decir, permiten generar mejoras en los programas actuales de mantenimiento a un bajo costo y a una alta disponibilidad.

Por tanto, queda a criterio de la empresa decidir la aplicación de los planes de mantenimiento definidos previamente para cada equipo en conjunto con el complemento de las inspecciones preventivas. De lo contrario, es posible mantener el plan actual de mantenimiento y apoyarlo por medio de las inspecciones.

6 CONCLUSIONES

En primera instancia la definición de estrategias de mantenimiento no entregó resultados concluyentes. Se atribuyó tal error al uso de costos deficientes y poco veraces. Sin embargo, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de costos que permitió verificar que los resultados obtenidos son aplicables inclusive cometiendo grandes errores en la estimación de costos correctivos y preventivos (Sobre 25% de error). En este sentido, es posible asumir que la definición de estrategia y tiempos de mantenimiento (Para estrategias preventivas) es la correcta.

Además, al estudiar el ahorro en concepto de costos de mantenimiento para los equipos críticos estudiados es posible concluir que es conveniente y recomendable la aplicación del plan de mantenimiento propuesto. De hecho, considerando el costo total de mantenimiento para los 6 equipos críticos analizados se tiene un ahorro aproximado del 25%.

Finalmente, se propone como alternativa y/o complemento de las tareas de mantenimiento actuales o futuras la aplicación de inspecciones de mantenimiento. Para ello se propone la utilización de los FMECA desarrollados con el objeto de seleccionar las tareas relacionadas con la inspección presencial y aplicarlas de acuerdo a las frecuencias óptimas calculadas. Esto representa una buena alternativa debido al bajo costo incurrido en ellas, relacionado principalmente con el costo de las horas hombre de la inspección.

Entonces, los resultados obtenidos son:

- **Ventilador aire combustión:** Mantenimiento preventivo cada 15 días / 6 inspecciones preventivas mensuales.
- **Sistema Kick-Off:** Mantenimiento preventivo cada 68 días / 4 inspecciones preventivas mensuales.
- **Lubricación Tren de Desbaste:** Mantenimiento preventivo cada 85 días / 4 inspecciones preventivas mensuales.
- **Lubricación Tren Medio:** Mantenimiento correctivo / 6 inspecciones preventivas mensuales.
- **Motor del Monoblock:** Mantenimiento preventivo cada 29 días / 11 inspecciones preventivas mensuales.
- **Sistema Neumático:** Mantenimiento preventivo cada 106 días / Inspección preventiva mensual.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Pascual: “El arte de mantener”, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, Edición 2.8, Santiago, 2005.

[2] V. Meruane: “Gestión de activos físicos. Apuntes para el curso ME-5701”. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. Primera Edición, Santiago, 2011

[3] 2º Encuentro en gestión de activos físicos, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, Santiago, 28 de Junio de 2007.

[4] A. Birolini: “Reliability Engineering. Theory and practice”. Springer, Sexta edición, Italia 2010.

[5] A. Jardine: “Maintenance, replacement and reliability”. Pitman Publishing, primera edición, Londres 1973.

[6] Woodhouse Jhon. “Criticality Analysis Revisited”, The Woodhouse Partnership Limited, Newbury, England 1994.