UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE

“ANÁLISIS DE FALLAS HISTÓRICAS EN FLOTA DE PERFORDORAS, PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DE ESTOS EQUIPOS EMPRESA MINERA”

RICARDO FELIPE MANZO ORREGO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MECÁNICO, MENCIÓN PRODUCCIÓN

PROFESOR GUÍA: DIPL. ING. UDO RHEINSCHMIDT

CO-REFERENTE USM: MBA ING. RENE VALDENEGRO

CO-REFERENTE EMPRESA: ING. JORGE VÁSQUEZ

SEPTIEMBRE-2022

Resumen

El objetivo principal de la presente memoria consiste en realizar un análisis a las fallas históricas de la flota de perforación en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, con el fin de generar un plan de acción enfocado a mejorar la confiabilidad de dicha flota.

Para llevar a cabo lo anterior, se analizó una base de datos con información de mantenciones desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2021. Se realizó un análisis de Pareto y Jack Knife, de acuerdo a la cantidad y duración de fallas, por equipo, sistema y subsistema, para determinar los equipos más relevantes y enfocar los esfuerzos en estos.

Teniendo lo anterior en consideración, y luego de realizar análisis de Jack Knife, fue posible clasificar las fallas de acuerdo a su criticidad y en base a esto presentar propuestas de acuerdo con dichos modos de falla, para aportar en la disminución de la cantidad de fallas y MTTR de estas, aumentando el MTBF y disponibilidad de dichos equipos.

Por otro lado, se realizó un análisis estadístico para determinar si el tiempo entre reparaciones mayores es el óptimo de acuerdo al comportamiento de cada flota. Para lo anterior se realizó análisis de Weibull en conjunto con Gamma, para determinar la confiabilidad y MTBF de acuerdo a la data histórica de los componentes mayores (motor, compresor, PTO y cabezal de rotación). En función a este análisis se proponen modificaciones al plan actual de mantenimiento para ayudar a mejorar la confiabilidad de los equipos, con la finalidad de disminuir la variabilidad de los procesos y de esta manera planificar mejor las mantenciones, buscando asegurar la continuidad operacional.

Abstract

The main objective of this report is to carry out an historical faults analysis of the drilling fleet at Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, in order to generate an action plan focused on improving the reliability of these fleet.

To carry out the above, a database was analyzed with maintenance information since september 2020 to december 2021. A Pareto and Jack Knife analysis was performed, according to the number and duration of failures, by equipment, system and subsystem, to determine the most relevant equipment and focus efforts on them.

Taking the above into consideration, and after performing a Jack Knife analysis, it was possible classify failures according to their criticality and based on this present proposals according to these failure modes, to contribute to the reduction of the number of failures and their MTTR, increasing the MTBF and the availability of such equipment.

On the other hand, a statistical analysis is performed to determine if the time between overhaul is the optimal according to the behavior of each fleet. For the above, it is done Weibull analysis in conjunction with Gamma, to determine reliability and MTBF according to the historical data of the major components (engine, compressor, PTO and rotating head). Based on this analysis, modifications to the current maintenance plan are proposed to help improve the reliability of the equipment, in order to reduce the variability of processes and in this way better planning maintenance, seeking to ensure operational continuity.

Glosario

ASARCO: "American Smelting & Refinering Co.". Norma que establece el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina o instalación incurren durante la operación.

CGR: Ciclo de Gestión de Riesgo.

CMDIC: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Disponibilidad Física: Porcentaje del tiempo nominal en que un equipo se encuentra disponible para realizar sus funciones. Se calcula como la razón entre el tiempo disponible (sin considerar pannes) y el tiempo nominal.

Disponibilidad Mecánica: Razón entre el tiempo disponible (sin considerar pannes de mantenimiento) y el tiempo nominal.

Downtime: Métrica de mantenimiento que hace referencia al tiempo de inactividad del equipo. Se usa para rastrear, monitorear y evaluar la confiabilidad de un activo.

KPI (Key Performance Indicator): Indicadores de rendimiento claves para la empresa o el negocio.

MTBF (Mean Time Between Failures:) Tiempo Medio Entre Fallas, corresponde al periodo de tiempo que transcurre entre dos fallas consecutivas de un equipo o componente.

MTTR (Mean Time to Repair): Tiempo Medio de Reparación, corresponde al tiempo promedio que se tarda en reparar una falla.

MTTF (Mean Time to Failures:) Tiempo Medio de Fallas, corresponde al tiempo medio entre fallo con la suposición de un modelo en que el sistema fallido no se repara inmediatamente.

RCA (Root Cause Analysis): Análisis causa-raíz de falla.

TBO (Time Between Overhaul): Tiempo entre reparaciones mayores.

Utilización Física: Indicador utilizado para calcular qué porcentaje del tiempo disponible de un equipo, este se encuentra operativo. Se calcula como la razón entre tiempo operativo y tiempo disponible.

Utilización Efectiva: Indicador utilizado para calcular qué porcentaje del tiempo operativo de un equipo, este se encuentra efectivamente realizando las funciones determinadas. Se calcula como la razón entre tiempo efectivo de trabajo y tiempo operativo.

Índice

1 Introducción **1**

2 Objetivos y Alcances **2**

2.1 Objetivo General 2

2.2 Objetivos Específicos 2

2.3 Alcances 2

3 Marco Teórico **4**

3.1 Antecedentes de la Compañía 4

3.1.1 Ubicación 5

3.1.2 Otros Antecedentes 6

3.2 Tipos de Perforación 6

3.2.1 Perforación por Percusión 6

3.2.2 Perforación por Rotación 7

3.2.3 Perforación Rotativa por Triconos 8

3.2.4 Perforación por Rotopercusión 8

3.3 Equipos de Perforación 9

3.3.1 Esquema General 11

3.3.2 Sistema de Rotación 12

3.3.3 Unidad de Potencia 13

3.3.4 Unidad de transmisión de Bombas (PTO) 14

3.3.5 Sistema de Rodado 14

3.3.6 Sistema de Nivelación 15

3.3.7 Sistema Hidráulico 16

3.4 Ciclo de Deming 16

3.4.1 Beneficios y Etapas 16

3.5 Ciclo de Gestión de Riesgos CMDIC 18

3.6 Estrategias de Mantenimiento 19

3.6.1 Mantenimiento Preventivo . . . 19
3.6.2 Mantenimiento Predictivo . . . 20
3.6.3 Mantenimiento Proactivo: . . . 21
3.6.4 Mantenimiento Correctivo . . . 22
3.6.5 Mantenimiento Prescriptivo . . . 22
3.7 Definición de Tiempos e Indicadores de Mantenimiento . . . 23
3.7.1 ASARCO CMDIC . . . 23
3.7.2 Confiabilidad . . . 24
3.7.3 Mantenibilidad . . . 24
3.8 Técnicas de Análisis de Fallas . . . 25
3.8.1 Análisis de Pareto . . . 25
3.8.2 Análisis de Jack Knife . . . 28
3.8.3 Análisis Causa-Raíz de Falla (RCA) . . . 29
3.8.4 Curva de la Bañera . . . 31
3.9 Modelos de Distribución . . . 34
3.9.1 Definiciones . . . 34
3.9.2 Modelos para Variables Aleatorias Discretas . . . 35
3.9.3 Modelos para Variables Aleatorias Continuas . . . 35
3.9.4 Distribución de Weibull a Partir de Base de Datos . . . 39
3.9.5 Obtención de MTBF y Tasa de Fallas a Partir de Weibull . . . 43
3.9.6 Patrones de Tasas de Fallas . . . 44

4 Desarrollo **46**
4.1 Análisis de datos . . . 46
4.1.1 Corrección base de datos . . . 47
4.1.2 Equipos y Flotas . . . 47
4.2 Análisis de Criticidad . . . 48
4.2.1 Diagramas de Pareto . . . 48
4.2.2 Diagramas Jack Knife . . . 56
4.3 Modelos de Confiabilidad . . . 62
4.3.1 Bucyrus 49HR . . . 63
4.3.2 Epiroc DML . . . 69
4.3.3 Cat MD6640 . . . 70
4.3.4 Sandvik D75KS . . . 72
4.3.5 Epiroc PV271 . . . 77
4.3.6 Epiroc PV351 . . . 79

5 Resultados **81**
5.1 Análisis de Pareto por Sistemas Relevantes . . . 81
5.1.1 Subsistemas de sistemas relevantes, PO12 . . . 81
5.1.2 Subsistemas de sistemas relevantes, PO17 . . . 81
5.1.3 Subsistemas de sistemas relevantes, PO25 . . . 81
5.1.4 Subsistemas de sistemas relevantes, PO21 . . . 82
5.1.5 Subsistemas de sistemas relevantes, PO13 . . . 82
5.1.6 Subsistemas de sistemas relevantes, PO16 . . . 82
5.1.7 Subsistemas de sistemas relevantes, PO18 . . . 82
5.1.8 Subsistemas de sistemas relevantes, PO20 . . . 82
5.1.9 Subsistemas de sistemas relevantes, PO23 . . . 83
5.2 Diagramas Jack Knife . . . 83
5.2.1 Priorización subsistemas PO12 . . . 83
5.2.2 Priorización subsistemas PO17 . . . 83
5.2.3 Priorización subsistemas PO25 . . . 84
5.2.4 Priorización subsistemas PO21 . . . 84
5.2.5 Priorización subsistemas PO13 . . . 85
5.2.6 Priorización subsistemas PO16 . . . 85
5.2.7 Priorización subsistemas PO18 . . . 86
5.2.8 Priorización subsistemas PO20 . . . 86
5.2.9 Priorización subsistemas PO23 . . . 86
5.3 Análisis de Weibull por Flotas . . . 87
5.3.1 Bucyrus 49HR . . . 88
5.3.2 Epiroc DML . . . 91
5.3.3 Cat MD6640 . . . 92
5.3.4 Sandvik D75KS . . . 93
5.3.5 Epiroc PV271 . . . 96
5.3.6 Epiroc PV351 . . . 97

6 Conclusiones **99**

7 Bibliografía **102**

8 Anexos **104**
8.1 Anexo A . . . 104
8.2 Anexo B . . . 151

Índice de Tablas

3.1 Ejemplo de tabla de datos requerida para regresión lineal. (fuente: elaboración propia) 42

4.1 Flotas de perforación según tipo y sus respectivos equipos. (fuente: elaboración propia) . . . 48
4.2 Ejemplo data cambio de componente, motor eléctrico PO01 - PO07. (fuente: Base de datos CMDIC) . . . 62
4.3 Fallas en motor eléctrico PO01 - PO07. (fuente: elaboración propia) . . . 63
4.4 Data regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 64
4.5 Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 65
4.6 Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 66
4.7 Fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 67
4.8 Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 68
4.9 Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 69
4.10 Fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 70
4.11 Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . 71
4.12 Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 72
4.13 Fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 73
4.14 Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 74
4.15 Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 75

4.16 Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 76
4.17 Fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 77
4.18 Fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 78
4.19 Fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 79
4.20 Fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 80

5.1 Resumen análisis de Weibull, compresor Bucyrus 49HR. (fuente: elaboración propia) 88
5.2 Resumen análisis de Weibull, motor eléctrico Bucyrus 49HR. (fuente: elaboración propia) . . . 89
5.3 Resumen análisis de Weibull, PTO Bucyrus 49HR. (fuente: elaboración propia) . . 90
5.4 Resumen análisis de Weibull, motor diesel Epiroc DML. (fuente: elaboración propia) 91
5.5 Resumen análisis de Weibull, compresor Cat MD6640. (fuente: elaboración propia) 92
5.6 Resumen análisis de Weibull, PTO Cat MD6640. (fuente: elaboración propia) . . . 92
5.7 Resumen análisis de Weibull, cabezal de rotación Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia) . . . 93
5.8 Resumen análisis de Weibull, compresor Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia) 93
5.9 Resumen análisis de Weibull, motor diesel Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia) . . . 94
5.10 Resumen análisis de Weibull, PTO 3 holes, Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia) . . . 95
5.11 Resumen análisis de Weibull, PTO 4 holes, Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia) . . . 95
5.12 Resumen análisis de Weibull, compresor Epiroc PV271. (fuente: elaboración propia) 96
5.13 Resumen análisis de Weibull, motor diesel Epiroc PV271. (fuente: elaboración propia) 97
5.14 Resumen análisis de Weibull, compresor Epiroc PV351. (fuente: elaboración propia) 97
5.15 Resumen análisis de Weibull, motor diesel Epiroc PV351. (fuente: elaboración propia) 98

6.1 Fallas en motor eléctrico PO01 - PO07. (fuente: elaboración propia) . . . 104
6.2 Fallas en motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: Base de datos CMDIC) . . . 105
6.3 Fallas en motor eléctrico, PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: Base de datos CMDIC) . . . 106

6.4 Fallas en motor eléctrico, PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 107
6.5 Data regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 108
6.6 Fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 109
6.7 Fallas en compresor PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 110
6.8 Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 111
6.9 Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 112
6.10 Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 113
6.11 Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 114
6.12 Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 115
6.13 Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 116
6.14 Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 117
6.15 Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 118
6.16 Fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 119
6.17 Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 120
6.18 Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 121
6.19 Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 122
6.20 Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 123
6.21 Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 124
6.22 Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 125
6.23 Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 126

6.24 Fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 127
6.25 Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . 128
6.26 Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 129
6.27 Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) 130
6.28 Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 131
6.29 Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 132
6.30 Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) 133
6.31 Fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 134
6.32 Fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 135
6.33 Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 136
6.34 Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 137
6.35 Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) 138
6.36 Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 139
6.37 Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 140
6.38 Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) 141
6.39 Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 142
6.40 Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 143
6.41 Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) 144
6.42 Fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 145
6.43 Fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 146

6.44 Fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 147
6.45 Fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 148
6.46 Fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 149
6.47 Fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 150
6.48 Mantenciones no programadas en subsistemas del compresor, PO12. (fuente: elaboración propia) . . . 151
6.49 Mantenciones no programadas en subsistemas del motor de inducción, PO12. (fuente: elaboración propia) . . . 151
6.50 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO12. (fuente: elaboración propia) . . . 151
6.51 Mantenciones no programadas en subsistemas del motor diesel, PO17. (fuente: elaboración propia) . . . 152
6.52 Mantenciones no programadas en subsistemas de la cabina, PO17. (fuente: elaboración propia) . . . 152
6.53 Mantenciones no programadas en subsistemas del compresor, PO17. (fuente: elaboración propia) . . . 153
6.54 Mantenciones no programadas en subsistemas del rodado, PO25. (fuente: elaboración propia) . . . 153
6.55 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO25. (fuente: elaboración propia) . . . 153
6.56 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO25. (fuente: elaboración propia) . . . 154
6.57 Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO25. (fuente: elaboración propia) . . . 154
6.58 Mantenciones no programadas en subsistemas de la cabina, PO25. (fuente: elaboración propia) . . . 154
6.59 Mantenciones no programadas en subsistemas del compresor, PO25. (fuente: elaboración propia) . . . 154
6.60 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO21. (fuente: elaboración propia) . . . 155
6.61 Mantenciones no programadas en subsistemas del motor diesel, PO21. (fuente: elaboración propia) . . . 155

6.62 Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO21. (fuente: elaboración propia) . . . 156
6.63 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO13. (fuente: elaboración propia) . . . 156
6.64 Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO13. (fuente: elaboración propia) . . . 157
6.65 Mantenciones no programadas en subsistemas del PTO, PO13. (fuente: elaboración propia) . . . 157
6.66 Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO16. (fuente: elaboración propia) . . . 157
6.67 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO16. (fuente: elaboración propia) . . . 158
6.68 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO16. (fuente: elaboración propia) . . . 158
6.69 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO16. (fuente: elaboración propia) . . . 158
6.70 Mantenciones no programadas en subsistemas del rodado, PO18. (fuente: elaboración propia) . . . 159
6.71 Mantenciones no programadas en subsistemas de la cabina, PO18. (fuente: elaboración propia) . . . 159
6.72 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO18. (fuente: elaboración propia) . . . 159
6.73 Mantenciones no programadas en subsistemas del motor diesel, PO20. (fuente: elaboración propia) . . . 160
6.74 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO23. (fuente: elaboración propia) . . . 160
6.75 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO23. (fuente: elaboración propia) . . . 160
6.76 Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO23. (fuente: elaboración propia) . . . 161

Índice de Figuras

1.1 Operación de equipos PitViper 271 y PitViper 351 en Chile y el mundo. 1

3.1 Ubicación de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. (fuente: Google Maps, abril 2022) 5
3.2 Yacimientos de Ujina y Rosario. (fuente: Google Maps, abril 2022) 6
3.3 Esquema de perforadora rotopercutiva con martillo de fondo (DTH). (fuente: Curso Perforadora P&H, Modelo 320XPC, TEM. Minera Caserones) 9
3.4 Esquema de perforadora rotopercutiva con martillo en cabezal. (fuente: Curso Perforadora P&H, Modelo 320XPC, TEM. Minera Caserones) 9
3.5 Perforadoras utilizadas en CMDIC. (fuente: Reunión de arranque programa de memorias, CMDIC.) 10
3.6 Equipo de perforación Pit Viper 351. (fuente: Capacitación equipos Drilling Solutions, 2006.) 11
3.7 Esquema de perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 11
3.8 Esquema de sistema de rotación y empuje en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 12
3.9 Esquema de sistema Unidad de Potencia en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 13
3.10 Esquema de unidad de transmisión de bombas (PTO) en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 14
3.11 Esquema de sistema de rodado en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 14
3.12 Esquema de sistema de nivelación en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 15
3.13 Esquema de sistema hidráulico en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones) 16
3.14 Ciclo de Deming, PHVA. (fuente: ingenieriadecalidad.com) 17

3.15 Ciclo de Gestión de Riesgo utilizado en CMDIC. (fuente: Inducción en Gestión de Riesgos, CMDIC) . . . 18
3.16 Esquema de estrategias de mantenimiento (fuente: El Arte de Mantener, Rodrigo Pascual) . . . 19
3.17 ASARCO CMDIC, definición de tiempos en perforación. (fuente: Reunión arranque memoria CMDIC) . . . 23
3.18 Descripción de tiempos de demoras, CMDIC. (fuente: Reunión arranque de memoria CMDIC) . . . 24
3.19 Esquema de relaciones entre MTBF, MTTR y MTTF. (fuente: support.maxongroup.com, Reliability analysis, Failure rate, MTBF) . . . 25
3.20 Ejemplo de diagrama de Pareto, organizado según cantidad de fallas. (fuente: Manual de Mantenimiento, Alejandro Pistarelli) . . . 27
3.21 Ejemplo de diagrama de Pareto, organizado según horas de mantenimiento. (fuente: Manual de Mantenimiento, Alejandro Pistarelli) . . . 27
3.22 Ejemplo de diagrama de disprsión Jack Knife, con límites MTTR y N. (fuente: Down time Priorities, Jack Knife Diagrams and the Businnes Cycle, Peter F Knights Centro de Minería, PUC) . . . 29
3.23 Diagrama con estructura de un árbol lógico para análisis RCA (fuente: Manual de Mantenimiento, Alejandro Pistarelli. . . . 31
3.24 Ejemplo curva de la bañera. (fuente: blog.infraspeak.com) . . . 32
3.25 P(a $\leq$ X $\leq$ b) = área debajo de la curva de densidad entre a y b. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore) . . . 35
3.26 Ejemplos de funciones de densidad de probabilidad normales. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore) . . . 36
3.27 Ejemplos de funciones de densidad de probabilidad exponenciales. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore) . . . 37
3.28 Ejemplos de densidad de probabilidad lognormales. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore) . . . 38
3.29 Ejemplo de regresión lineal. (fuente: elaboración propia) . . . 42
3.30 Ejemplo de curva de confiabilidad usando distribución de Weibull de dos parámetros. (fuente: elaboración propia) . . . 43
3.31 Patrones de probabilidad acumulada de fallos. (fuente: Reliability Centered Maintenance, Nowlan & Heap) . . . 45

4.1 Diagrama de Pareto por equipos. (fuente: elaboración propia) . . . 48
4.2 Diagrama de Pareto por sistemas. (fuente: elaboración propia) . . . 49
4.3 Pareto por subsistemas. (fuente: elaboración propia) . . . 50

4.4 Pareto por subsistemas, detalle de sistemas relevantes. (fuente: elaboración propia) 50
4.5 Pareto por sistemas, PO12. (fuente: elaboración propia) 51
4.6 Pareto por sistemas, PO17. (fuente: elaboración propia) 52
4.7 Pareto por sistemas, PO25. (fuente: elaboración propia) 52
4.8 Pareto por sistemas, PO21. (fuente: elaboración propia) 53
4.9 Pareto por sistemas, PO13. (fuente: elaboración propia) 53
4.10 Pareto por sistemas, PO16. (fuente: elaboración propia) 54
4.11 Pareto por sistemas, PO18. (fuente: elaboración propia) 55
4.12 Pareto por sistemas, PO20. (fuente: elaboración propia) 55
4.13 Pareto por sistemas, PO23. (fuente: elaboración propia) 56
4.14 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO12. (fuente: elaboración propia) 57
4.15 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO17. (fuente: elaboración propia) 57
4.16 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO25. (fuente: elaboración propia) 58
4.17 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO21. (fuente: elaboración propia) 59
4.18 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO13. (fuente: elaboración propia) 59
4.19 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO16. (fuente: elaboración propia) 60
4.20 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO18. (fuente: elaboración propia) 60
4.21 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO20. (fuente: elaboración propia) 61
4.22 Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO23. (fuente: elaboración propia) 61
4.23 Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia) 63
4.24 Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia) 63
4.25 Curva de confiabilidad motor eléctrico PO01-PO07. (fuente elaboración propia) . . 63
4.26 Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 64
4.27 Fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19, regresión lineal (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 64

4.28 Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 64
4.29 Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 65
4.30 Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 65
4.31 Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 65
4.32 Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 66
4.33 Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 66
4.34 Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 66
4.35 Tasa de fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 67
4.36 Regresión lineal, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 67
4.37 Curva de confiabilidad, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 67
4.38 Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 68
4.39 Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 68
4.40 Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 68
4.41 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 69
4.42 Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 69
4.43 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 69
4.44 Tasa de fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 70
4.45 Regresión lineal, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 70
4.46 Curva de confiabilidad, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 70

4.47 Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 71
4.48 Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 71
4.49 Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 71
4.50 Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 72
4.51 Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 72
4.52 Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 72
4.53 Tasa de fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 73
4.54 Regresión lineal, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 73
4.55 Curva de confiabilidad, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 73
4.56 Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 74
4.57 Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 74
4.58 Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 74
4.59 Tasa de fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 75
4.60 Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 75
4.61 Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 75
4.62 Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 76
4.63 Regresión lineal, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 76
4.64 Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 76

4.65 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 77
4.66 Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 77
4.67 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 77
4.68 Tasa de fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 78
4.69 Regresión lineal, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 78
4.70 Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 78
4.71 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 79
4.72 Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 79
4.73 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 79
4.74 Tasa de fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 80
4.75 Regresión lineal, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 80
4.76 Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 80

6.1 Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia) 104
6.2 Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia) 104
6.3 Curva de confiabilidad motor eléctrico PO01-PO07. (fuente elaboración propia) . . 104
6.4 Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 105
6.5 Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 105
6.6 Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 105
6.7 Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) 106

6.8 Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 106
6.9 Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 106
6.10 Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 107
6.11 Regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 107
6.12 Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 107
6.13 Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 108
6.14 Fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19, regresión lineal (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 108
6.15 Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 108
6.16 Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 109
6.17 Regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 109
6.18 Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 109
6.19 Tasa de fallas en compresor PO01 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 110
6.20 Regresión lineal, compresor PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 110
6.21 Curva de confiabilidad, compresor PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 110
6.22 Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 111
6.23 Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 111
6.24 Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 111
6.25 Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 112
6.26 Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 112

6.27 Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 112
6.28 Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 113
6.29 Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 113
6.30 Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 113
6.31 Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 114
6.32 Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 114
6.33 Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 114
6.34 Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 115
6.35 Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 115
6.36 Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 115
6.37 Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 116
6.38 Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 116
6.39 Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 116
6.40 Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 117
6.41 Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 117
6.42 Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 117
6.43 Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 118
6.44 Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 118

6.45 Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 118
6.46 Tasa de fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . 119
6.47 Regresión lineal, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . 119
6.48 Curva de confiabilidad, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 119
6.49 Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 120
6.50 Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 120
6.51 Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 120
6.52 Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 121
6.53 Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 121
6.54 Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 121
6.55 Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 122
6.56 Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 122
6.57 Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 122
6.58 Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 123
6.59 Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 123
6.60 Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 123
6.61 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 124
6.62 Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 124
6.63 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 124

6.64 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 125
6.65 Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 125
6.66 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 125
6.67 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 126
6.68 Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 126
6.69 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 126
6.70 Tasa de fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 127
6.71 Regresión lineal, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 127
6.72 Curva de confiabilidad, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 127
6.73 Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 128
6.74 Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 128
6.75 Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 128
6.76 Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 129
6.77 Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 129
6.78 Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 129
6.79 Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 130
6.80 Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 130
6.81 Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 130

6.82 Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 131
6.83 Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 131
6.84 Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 131
6.85 Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 132
6.86 Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 132
6.87 Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 132
6.88 Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 133
6.89 Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 133
6.90 Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 133
6.91 Tasa de fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 134
6.92 Regresión lineal, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 134
6.93 Curva de confiabilidad, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 134
6.94 Tasa de fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 135
6.95 Regresión lineal, compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 135
6.96 Curva de confiabilidad, compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 135
6.97 Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 136
6.98 Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 136
6.99 Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 136

6.100 Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 137
6.101 Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 137
6.102 Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 137
6.103 Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 138
6.104 Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 138
6.105 Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 138
6.106 Tasa de fallas en PTO 3 holes, Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 139
6.107 Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 139
6.108 Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 139
6.109 Tasa de fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 140
6.110 Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 140
6.111 Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 140
6.112 Tasa de fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 141
6.113 Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 141
6.114 Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 141
6.115 Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 142
6.116 Regresión lineal, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 142
6.117 Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 142

6.118 Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 143
6.119 Regresión lineal, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 143
6.120 Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 143
6.121 Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 144
6.122 Regresión lineal PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 144
6.123 Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 144
6.124 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 145
6.125 Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 145
6.126 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 145
6.127 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 146
6.128 Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 146
6.129 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) . . . 146
6.130 Tasa de fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 147
6.131 Regresión lineal, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 147
6.132 Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 147
6.133 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 148
6.134 Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 148
6.135 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) . . . 148

6.136 Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 149
6.137 Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 149
6.138 Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia) 149
6.139 Tasa de fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 150
6.140 Regresión lineal, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 150
6.141 Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia) 150

Capítulo 1

Introducción

Las perforadoras son equipos imprescindibles para la extracción de mineral en la mina a rajo abierto, ya que estas se encargan de hacer los pozos o barrenos en los cuales posteriormente se introducen explosivos para realizar tronaduras y poder extraer el mineral del yacimiento.

A modo de contextualización, es posible observar el uso de estos equipos en distintas mineras del país y del mundo, como se observa en la siguiente figura.

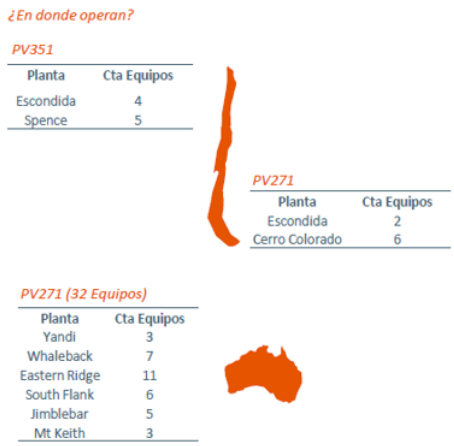

Figura 1.1: Operación de equipos PitViper 271 y PitViper 351 en Chile y el mundo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace muy claro el por qué se requiere contar con estos equipos disponibles el mayor tiempo posible y es ahí donde surge la necesidad de analizar los modos de fallas históricos en la flota de perforadoras, para así poder trazar un plan de acción y aumentar la disponibilidad de los equipos, ayudando de esta manera a mejorar la producción de la compañía y poder cumplir con la promesa de negocio que CMDIC tiene con sus accionistas.

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

2.1 Objetivo General

Generar un plan de acción para disminuir las mantenciones imprevistas en las flotas de perforación de CMDIC, mejorando la disponibilidad, el MTBF y el MTTR de los equipos.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los equipos que presentan más fallas imprevistas y/o de mayor duración.
- Determinar los sistemas y subsistemas que presenten las fallas más relevantes.
- Clasificar las fallas de los equipos según su duración y periodicidad, realizando diagrama Jack Knife, determinando de esta manera la criticidad de cada modo de falla.
- Proponer alternativas para la mejora de disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad de la flota.

2.3 Alcances

El presente documento estudiará las fallas históricas producidas entre septiembre de 2020 y diciembre de 2021 de la flota de perforadoras en la Gerencia de Perforación, Tronadura y Desarrollo, Vicepresidencia Mina, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Específicamente se analizarán 6 flotas de perforadoras, de las cuales 2 poseen equipos de contorno y las otras 4 flotas poseen equipos utilizados para producción. Un total de 15 equipos, de los cuales 5 corresponden a perforadoras de contorno y 10 a perforadoras de producción.

Las flotas de perforadoras de contorno cuentan específicamente con :

- 3 equipos marca Epiroc, modelo DML HP (flota Epiroc DML)
- 2 equipos marca Sandvik, modelo D75KS (flota Sandvik D75)

Mientras que las flotas de producción están constituidas por:

- 4 equipos marca Bucyrus, modelo 49HR (flota Cat 49HR)
- 3 equipos marca Caterpillar, modelo MD6640 (flota Cat MD6640)
- 1 equipo marca Epiroc, modelo PitViper 271 (flota Epiroc PV271)
- 2 equipos marca Epiroc, modelo PitViper 351 (flota Epiroc PV351)

Además de lo anterior se realizará un análisis estadístico a los componentes mayores (motor, compresor, PTO y cabezal de rotación) a partir de una base de datos histórica, la cual contiene información respecto al tiempo entre mantenciones mayores (TBO) de las flotas analizadas. Todo esto se realiza con la finalidad de determinar la confiabilidad obtenida a partir del plan de mantenimiento y si es necesario modificar el TBO actual en pos de asegurar la continuidad operacional.

Capítulo 3

Marco Teórico

La presente memoria se lleva a cabo en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), en la Gerencia de Perforación, Tronadura y Desarrollo. Por lo tanto parece correcto comenzar con una pequeña introducción de la compañía.

3.1 Antecedentes de la Compañía

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi es una sociedad contractual minera cuyos accionistas son Anglo American plc (44%), Glencore (44%) y Japan Collahuasi Resources B.V. (12%), las que están representadas en su Directorio.

- **Anglo American plc:** Es una de las mayores compañías mineras del mundo, su casa matriz está en el Reino Unido y cotiza principalmente en la bolsa de Londres. Su cartera de negocios abarca metales preciosos en los que es líder global en platino y diamantes; metales –cobre y níquel–; productos a granel de mineral de hierro, carbón metalúrgico y carbón térmico. Anglo American está comprometida con los más altos estándares en seguridad y responsabilidad en todos sus negocios y países y en hacer una diferencia sostenible en el desarrollo de las comunidades cercanas a sus faenas. Sus operaciones mineras y extensa cartera de proyectos de crecimiento están localizados en África, Sudamérica, Australia, Norteamérica y Asia.

- **Glencore:** Es una de las empresas de recursos naturales más grandes del mundo. Es líder en la producción y comercialización de materias primas, con una cartera equilibrada de diversos activos industriales; cuenta con un posicionamiento sólido para crear valor agregado en cada etapa de la cadena de suministro, desde la obtención de materiales del subsuelo hasta el suministro de productos a una base de clientes internacional. Las actividades industriales y de marketing del Grupo se apoyan en una red global de más de 90 oficinas situadas en más de 50 países. Sus operaciones diversificadas abarcan sobre 150 explotaciones mineras y

metalúrgicas, plataformas petrolíferas, granjas e instalaciones agrícolas. Tiene aproximadamente 190.000 trabajadores.

- **Japan Collahuasi Resources B.V. :** Es una empresa perteneciente a Mitsui & Co., Ltd., una de las mayores compañías de trading e inversión de la nación nipona.

CMDIC se dedica a la extracción y producción de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno. Sus niveles de producción, sumado a sus recursos de mineral, su extensión y emplazamiento, lo sitúan dentro de las seis principales productoras cupríferas del mundo y la segunda más grande de Chile. Cuenta con uno de los depósitos de cobre más grandes del planeta, con 10.380 millones de toneladas.

3.1.1 Ubicación

Los yacimientos de Collahuasi se emplazan en el altiplano del desierto de Atacama, a 4.400 msnm, una zona andina que se caracteriza por tener un clima lluvioso en verano y nevadas ocasionales en invierno. A 40 km de las operaciones de la mina se ubica el poblado de Huatacondo, y a 130 y 135 km las localidades de Pica y Matilla respectivamente, las que están rodeadas de zonas de alto valor por su diversidad biológica, como salares, humedales y bofedales.

Figura 3.1: Ubicación de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. (fuente: Google Maps, abril 2022)

La explotación de mineral se realiza a rajo abierto, contando con los yacimientos de Ujina y Rosario. En el sector de Ujina se encuentra la planta concentradora, desde donde nace un mineroducto de 203 km, a través del cual el concentrado de cobre es trasladado como pulpa hasta

las instalaciones de filtrado y embarque de la compañía ubicadas en Punta Patache, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, donde se embarcan los productos hacia mercados internacionales.

Figura 3.2: Yacimientos de Ujina y Rosario. (fuente: Google Maps, abril 2022)

3.1.2 Otros Antecedentes

Según lo informado en el reporte de sustentabilidad, durante el año 2020 la compañía logró producir 629.099 toneladas de cobre fino, generando pagos de impuesto al Estado por US$736 millones, la mayor cifra por concepto de tributos realizada por la empresa hasta ahora y que incluyen US$144 millones por concepto de Impuesto Específico a la Minería (IEM).

Es así como durante el ejercicio 2020 la estimación de impacto directo e indirecto de Collahuasi en la economía nacional marcó un récord, con US$4.777 millones, equivalente al 1,92% del PIB Nacional y al 49,6% del PIB de Tarapacá. Lo cual demuestra la importancia que tiene CMDIC a nivel nacional y su enorme aporte en la economía del país.

3.2 Tipos de Perforación

Existen dos formas básicas de atacar la roca mecánicamente, a lo cual se le denomina mecánica de penetración y estas son: percusión y rotación. Hay cuatro métodos comerciales de perforación que de ellos se derivan y que utilizan estos principios o combinaciones de ellos, los cuales son:

3.2.1 Perforación por Percusión

En la perforación a percusión, el aplicador de la energía lo constituye la broca, que golpea la roca con una frecuencia similar al de un martillo, el rebote de la herramienta al golpear la roca, es

aprovechado para darle movimiento de rotación a la misma. El torque aplicado, no es responsable de la penetración en la roca por ser muy pequeño en magnitud y se produce sólo en el momento del rebote. La función de la fuerza de empuje aplicada es la de mantener la herramienta en contacto permanente con la roca, de manera que la tensión requerida para la rotura de la roca sea aplicada por el impacto del golpe en dirección axial y en forma discontinua.

- La roca es deformada elásticamente con fracturación de la superficie primitiva.
- Formación de grietas de tracción primarias que se radian hacia fuera por efecto de la gran concentración de esfuerzos en el punto de aplicación de la broca.
- Propagación de grietas secundarias a lo largo de las trayectorias de cizalla y a partir de las grietas primarias, formando largos fragmentos de roca.
- Rotura de los fragmentos de roca durante el rebote y extracción de los mismos mediante la acción del fluido de circulación, resultando la creación de un cráter.
- Se forma una nueva superficie y la secuencia se repite.

3.2.2 Perforación por Rotación

La acción de "afeitado" o raspado de la superficie de la roca, para crear una superficie nueva en la perforación a rotación, es obtenido por una variedad de herramientas que incluyen cuchillas, diamante, cables, cadenas y cortadoras rotativas.

La acción de corte de la roca por el diseño geométrico de la herramienta es efectuada por dos fuerzas: el empuje (carga estática aplicada axialmente) y el torque o par de giro (el componente de la fuerza rotacional aplicada tangencialmente).

- Al entrar en contacto la herramienta con la roca, aparecen las deformaciones elásticas.
- La roca es fracturada en la zona de grandes esfuerzos, adyacente a la herramienta (zona de contacto).
- Las grietas se propagan a lo largo de la trayectoria del corte formando esquirlas.
- La herramienta gira y se pone en contacto con una nueva superficie, desplazando los fragmentos de roca obtenidos en el corte (detritus), los cuales son expulsados por el fluido de circulación.
- Se forma una nueva superficie y la secuencia se repite.

3.2.3 Perforación Rotativa por Triconos

En la perforación con triconos, es utilizado el mismo principio de la perforación por rotación, utilizando altos niveles de empuje y rotación (torque) en maquinas de gran tamaño y de gran peso. La geometría de la broca tricónica presenta un híbrido de acción de corte combinando la acción de la perforación por percusión con la perforación por rotación. Al accionar la herramienta, los dientes contenidos en cada cono, alternadamente, hacen contacto con la roca, combinado el golpeteo de los dientes con el efecto de raspado dado por el movimiento de rotación. El agrietamiento y fracturamiento de la roca ocurren de manera similar a los dos tipos de mecánica de penetración de la roca.

3.2.4 Perforación por Rotopercusión

Esta también es una forma híbrida de perforación, combina separadamente la percusión con la rotación. La superposición de los sistemas de percusión y rotación implica la aplicación de grandes fuerzas de impacto con el efecto de corte de la rotación. Los parámetros principales que definen la penetración por parte del equipo son:

- Energía de golpeteo.
- Velocidad de rotación.
- Par.
- Empuje.

Los parámetros secundarios serán los relativos a la forma y diseño de los insertos, dientes o herramientas de arranque o percusión, así como el volumen o presión del fluido de circulación. La optimización del proceso está determinada por la producción del tamaño adecuado del detritus generado por la perforación y su rápida evacuación para reducir al máximo la energía utilizada en remoler y reciclar los trozos ya rotos. La cantidad de energía necesaria es proporcional a la cantidad de nueva superficie creada, al fracturar innecesariamente, aumentamos de manera significativa las nuevas superficies y, por tanto, el consumo de energía aumenta.

A su vez, se puede subdividir este tipo de perforación en dos, cuya variación se debe al punto donde se produce la percusión y rotación, estas son:

1. **Martillo de Fondo (DTH = Down The Hole):** Percusión se realiza directamente sobre la broca de perforación (bit) y la rotación se realiza en el exterior. (ROC-L8)

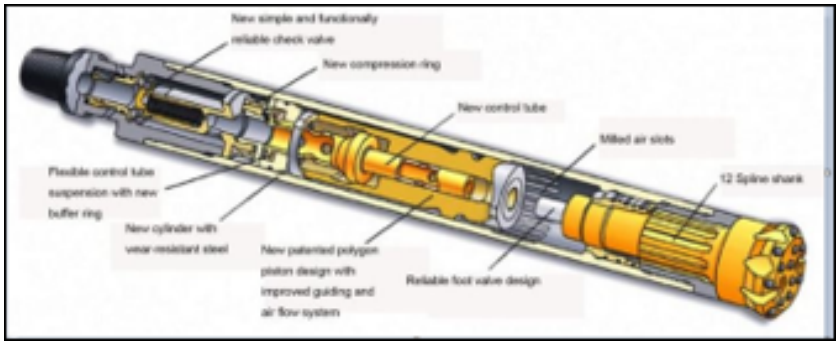

Figura 3.3: Esquema de perforadora rotopercutiva con martillo de fondo (DTH). (fuente: Curso Perforadora P&H, Modelo 320XPC, TEM. Minera Caserones)

2. **Martillo en Cabezal:** Percusión y rotación se producen fuera del pozo, transmitiéndose a través de las barras hasta la boca de perforación.

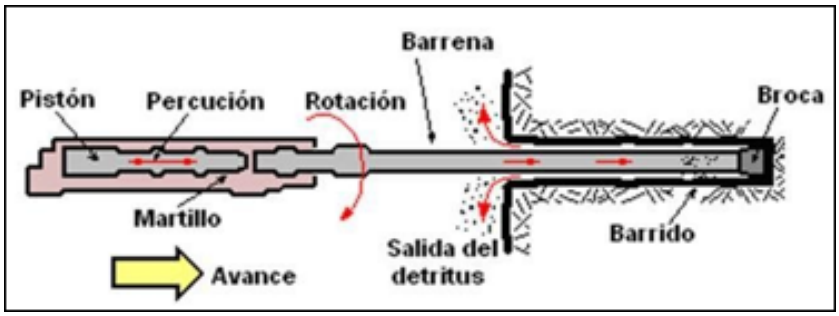

Figura 3.4: Esquema de perforadora rotopercutiva con martillo en cabezal. (fuente: Curso Perforadora P&H, Modelo 320XPC, TEM. Minera Caserones)

3.3 Equipos de Perforación

Las flotas de perforación utilizadas en CMDIC se pueden dividir en dos grupos según su uso, estos son: **producción** o **contorno**. Los equipos de contorno poseen un diámetro de perforación de 7 7/8 ", inferior a los equipos de producción ya que su función es realizar barrenos [1] en sectores específicos de la mina, donde se requiere tener cuidado con estructuras de túneles subterráneos. Por otro lado, los equipos de producción poseen un diámetro de perforación que varía entre 10 5/8" y 12 1/4", para realizar barrenos o pozos más grandes, donde se pueda introducir mayor cantidad de explosivos y de esta manera obtener la mayor cantidad posible de mineral luego de realizar la tronadura[2].

[1]Se denomina barreno a los pozos o agujeros generados por estos equipos de perforación

[2]La tronadura es la operación que tiene por finalidad el arranque del mineral desde el macizo rocoso, aprovechando de la mejor manera posible la energía liberada por el explosivo colocado en los tiros realizados en la etapa de perforación.

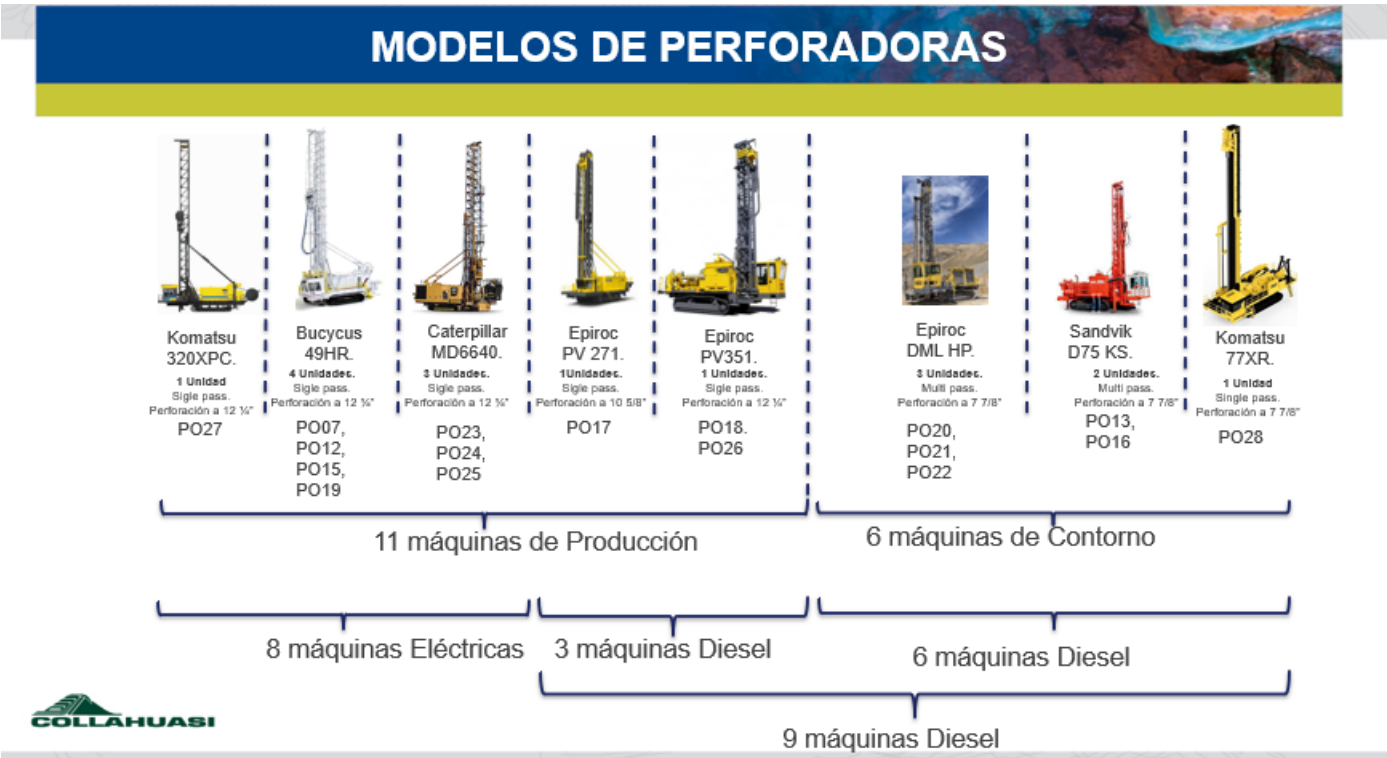

Figura 3.5: Perforadoras utilizadas en CMDIC. (fuente: Reunión de arranque programa de memorias, CMDIC.)

En la figura 3.5 se presentan la 8 flotas de perforadoras que actualmente operan en CMDIC, de las cuales 2 se encuentran en arriendo y por este motivo quedan fuera del análisis en la presente memoria, estas son: Komatsu 320XPC y Komatsu 77XR. De las perforadoras restantes se observan 4 flotas de producción (10 equipos, 7 eléctricos y 3 diesel) y 2 flotas de contorno (5 equipos, todos diesel).

3.3.1 Esquema General

Figura 3.6: Equipo de perforación Pit Viper 351. (fuente: Capacitación equipos Drilling Solutions, 2006.)

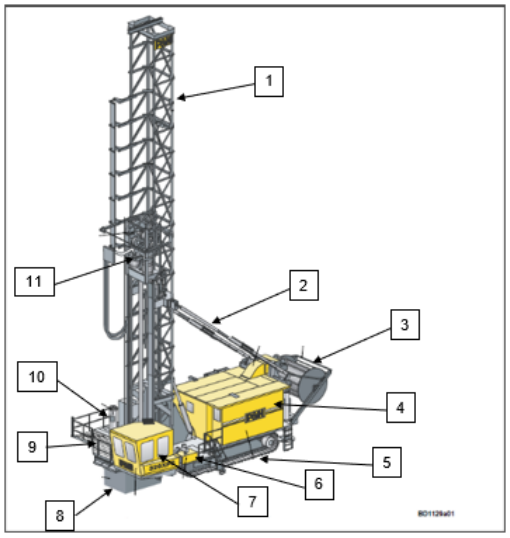

Figura 3.7: Esquema de perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

La figura anterior muestra el esquema general de un equipo de perforación, si bien el esquema corresponde específicamente a una perforadora P&H 320XPC, el principio constructivo y de funcionamiento de los diversos modelos de perforadoras es el mismo, por lo tanto este esquema resultará muy útil para comprender los distintos sistemas de un equipo de perforación. A partir de la figura 3.7 presentada anteriormente se pueden observar los sistemas que se detallan a continuación:

1. Mástil.
2. Brazo tensor.
3. Tambor de cable.
4. Sala de máquinas.
5. Conjunto de orugas.
6. Aire acondicionado.
7. Cabina operador.
8. Cortina antipolvo.
9. Plataforma.
10. Gato nivelación.
11. Carro de rotación.

3.3.2 Sistema de Rotación

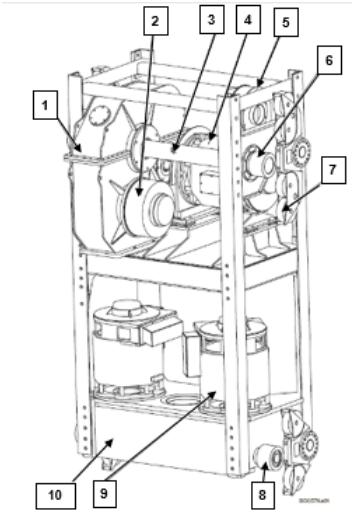

Figura 3.8: Esquema de sistema de rotación y empuje en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

En la figura 3.8 se distinguen los siguientes componentes:

1. Caja engranaje pulldown.
2. Freno pulldown.
3. Eje transmisión.
4. Motor pulldown.
5. Ventilador puldown.
6. Piñón motriz.
7. Rueda guía.
8. Rueda tensora.
9. Motor accionamiento rotatorio.
10. Caja engranajes rotación.

Este sistema posee dos características o funciones principales, las cuales se explican a continuación:

Pulldown o empuje: El empuje se genera mediante un motor que acciona la caja de engranajes, en la cual se, encuentra el eje de transmisión y este activa el piñón motriz para posteriormente transmitir el pulldown mediante la cremallera, la cual va montada verticalmente en el mástil.

Rotación: Dos motores accionan el eje motriz rotatorio, a través de la caja de engranajes rotatoria.

3.3.3 Unidad de Potencia

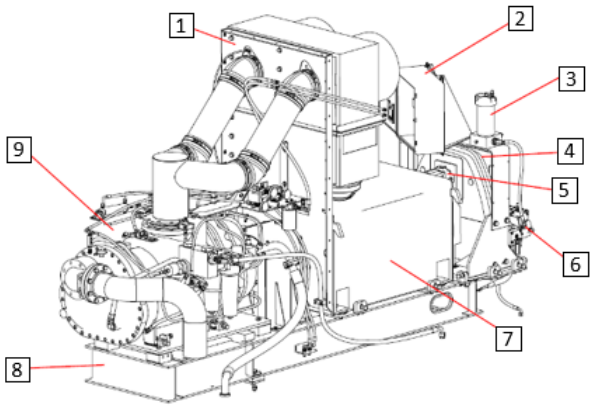

Figura 3.9: Esquema de sistema Unidad de Potencia en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

La figura 3.9 muestra los siguientes componentes:

1. Filtros aire entrada.
2. Gabinete eléctrico (unidad de potencia).
3. Filtro carga hidráulica.
4. Unidad transmisión de bombas (PDT - PTO).
5. Bomba hiráulica auxiliar.
6. Bomba hidráulica sistema de propulsión.
7. Motor principal.
8. Base.
9. Compresor principal.

3.3.4 Unidad de transmisión de Bombas (PTO)

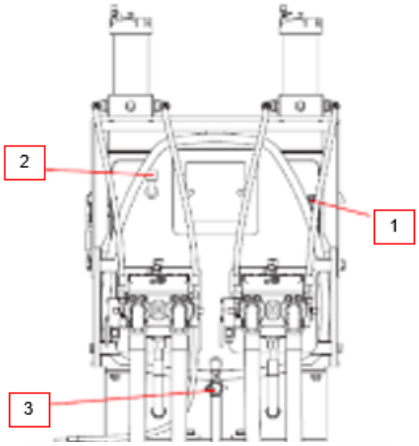

Figura 3.10: Esquema de unidad de transmisión de bombas (PTO) en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

La unidad de transmisión de bombas o PTO es la encargada de distribuir el torque del motor hacias las bombas hidráulicas conectadas.En el esquema de la figura 3.10 se puede observar:

1. Varilla nivel de aceite.
2. Tapón ventilación y llenado.
3. Válvula y tubería drenado.

3.3.5 Sistema de Rodado

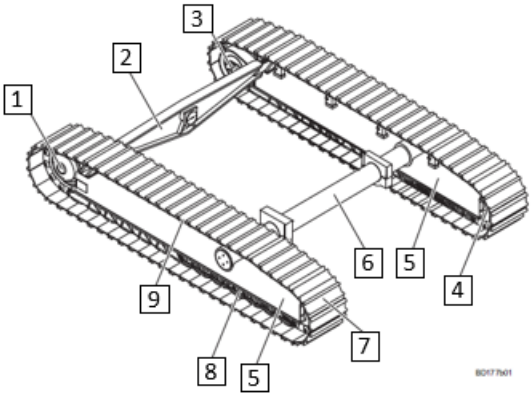

Figura 3.11: Esquema de sistema de rodado en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

En el sistema de rodado, las 2 orugas son accionadas por ruedas motrices con transmisiones planetarias atornilladas directamente al bastidor de la oruga. Cada transmisión es impulsada por 1 Motor hidrostático independiente (transmisión va alojada dentro de rueda motriz para protección en zonas irregulares); cada transmisión cuenta con un freno de estacionamiento integral de discos múltiples tipo húmedo. Los 2 bastidores se conectan en la parte inferior de la estructura principal mediante un eje trasero fijo y un eje delantero oscilante (Mayor estabilidad y aisla a estructura principal de la carga excesiva en terrenos irregulares). Por otro lado, en la figura 3.10 se observan los siguientes componentes:

1. Transmisión de propulsión.
2. Eje ecualizador (pivote).
3. Motor de propulsión.
4. Rueda tensora.
5. Bastidor de oruga.
6. Eje principal.
7. Tren de oruga.
8. Rodillos inferiores.
9. Rodillos superiores.

3.3.6 Sistema de Nivelación

Figura 3.12: Esquema de sistema de nivelación en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

El sistema de nivelación mostrado en la figura 3.12 posee 4 cilindros o gatos hidráulicos, de los cuales se puede observar uno encerrado en un círculo rojo, estos se pueden controlar por control remoto o desde la cabina y se encargan de posicionar el equipo de forma horizontal respecto al piso, para realizar los pozos de la mejor manera posible.

3.3.7 Sistema Hidráulico

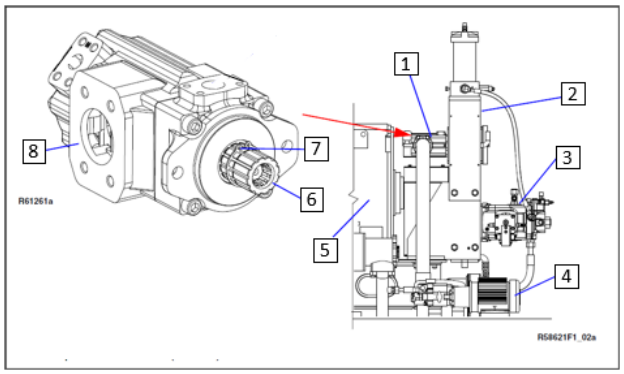

Figura 3.13: Esquema de sistema hidráulico en perforadora P&H 320XPC. (fuente: Curso de Instructores Mina Caserones)

En la figura anterior se detallan los siguientes componentes:

1. Bomba auxiliar.
2. Unidad transmisión de bombas (PTO).
3. Bombas hidráulicas principales.
4. Bomba de baja presión.
5. Motor.
6. Adaptador de estrías bomba.
7. Anillo retención.
8. Puerto de succión.

3.4 Ciclo de Deming

El Ciclo de Deming, es la metodología más usada para solucionar problemas y ejecutar sistemas de mejora continua. Su aplicación ayuda a que las organizaciones mejoren su rendimiento y aumenten su productividad.

El Ciclo de Deming se compone de 4 fases y se basa en el supuesto de que una empresa debe seguir mejorando para poder competir en el mercado.

3.4.1 Beneficios y Etapas

Dentro de los beneficios obtenidos al utilizar este ciclo como herramienta de gestión, es posible destacar los siguientes:

- Disminución de los tiempos en los procesos.
- Aumento de la productividad.
- Disminución y prevención de fallos y errores.
- Optimización en el uso de los recursos de la empresa (materiales, humano, dinero, etc.).

Este ciclo está compuesto por cuatro etapas cíclicas, las cuales, al finalizar la última etapa se vuelve a comenzar por la etapa 1 del ciclo; estas etapas son:

1. **Planificar:** En esta etapa se identifican los problemas, se establecen los objetivos (incluye la forma de medición) y se definen los métodos para conseguir los objetivos establecidos.
2. **Hacer:** En esta etapa se implementa el plan de acción (de la fase anterior), en ocasiones conviene realizar una prueba piloto para probar el funcionamiento antes de realizar los cambios a gran escala.
3. **Verificar:** En esta etapa una vez implantada la mejora se comprueban los logros obtenidos en relación a las metas u objetivos que se marcaron en la primera fase, es importante determinar el grado de cumplimiento que hemos obtenido.
4. **Actuar:** En esta etapa se estudian los resultados, se toma acciones correctivas o preventivas para mejorar continuamente el desempeño de los procesos.

Figura 3.14: Ciclo de Deming, PHVA. (fuente: ingenieriadecalidad.com)

3.5 Ciclo de Gestión de Riesgos CMDIC

El Ciclo de Gestión de Riesgos (CGR) utilizado en CMDIC está basado en el ciclo de Deming, y consiste en un proceso continuo que da las directrices sobre cómo trabajar dentro de la compañía. Todos los procesos de CMDIC se planifican en función de este CGR y se van retroalimentando en el tiempo, con el fin de disminuir la variabilidad e incertidumbre en los procesos que afectan al negocio.

Figura 3.15: Ciclo de Gestión de Riesgo utilizado en CMDIC. (fuente: Inducción en Gestión de Riesgos, CMDIC)

Este CGR está compuesto por 6 etapas, las cuales se detallan a continuación:

1. **Mapa del proceso:** Puede considerarse como parte de la planificación y describe el desarrollo de las actividades de un proceso, está compuesto por 3 partes:
   - **Entradas:** Son todos los documentos o actividades que sirven de input.
   - **Proceso:** Actividades que forman parte medular de la tarea a realizar.
   - **Salidas:** Resultados o documentos generados a partir de la actividad en cuestión.
2. **Matriz de riesgos:** También es parte de la planificación, en esta etapa se identifican los posibles riesgos o peligros asociados a las actividades a realizar, definidas en la etapa anterior. Se deben clasificar estos riesgos en función de su probabilidad de ocurrencia y consecuencias que estos pueden generar, identificando los riesgos con una escala de colores tipo semáforo (rojo, amarillo, verde).
3. **Planes de mitigación y control:** Aún en planificación, en esta etapa se definen los planes de control o mitigación para los riesgos identificados en la etapa anterior.

4. **Procedimientos de trabajo:** En esta etapa ya se entra a la ejecución de la tarea previamente planificada. Para poder llevarla a cabo es necesario contar con un procedimiento de trabajo, con el fin de estandarizar las actividades y minimizar los riesgos asociados a estas.

5. **Verificación y autorización:** En esta etapa se debe verificar la efectividad de los controles aplicados, en caso de no ser los óptimos, se deben mejorar o crear nuevos controles en la siguiente etapa.

6. **Investigación de incidentes:** Esta es una etapa de conocimiento y aprendizaje, ya que en este punto se generan aprendizajes en base a las desviaciones respecto a lo planeado en el mapa de proceso, en base a estas se debe generar una retroalimentación con el fin de minimizar los riesgos o variaciones en la planificación. Solamente a partir de esta etapa se puede comenzar a modificar los procesos planificados en la etapa 1.

3.6 Estrategias de Mantenimiento

A continuación se presenta en la figura 3.16 un esquema con las diversas estrategias de mantenimiento, ya sea que se pretenda realizar el mantenimiento previo a una falla o posterior a esta.

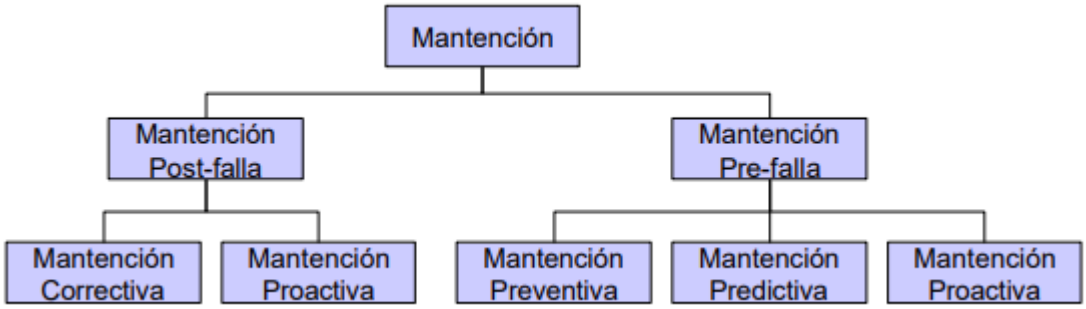

Figura 3.16: Esquema de estrategias de mantenimiento (fuente: El Arte de Mantener, Rodrigo Pascual)

3.6.1 Mantenimiento Preventivo

Corresponde a la ejecución planificada de inspecciones periódicas, cíclicas y programadas en las instalaciones, máquinas o equipos, con la finalidad de disminuir incidentes inesperados y mantener un mayor tiempo de operación continua.

El mantenimiento preventivo no se basa en el estado de una máquina. En cambio, se basa en las recomendaciones del fabricante del activo o en el ciclo de vida medio de un activo. Al

ser realizado de manera constante, el mantenimiento preventivo puede ayudar a la organización a evitar costosos periodos de inactividad e interrupciones.

Ventajas del mantenimiento preventivo:

- Mayor seguridad.
- Ciclos de vida más largos.
- Reducción del tiempo de inactividad no planificado.

Desventajas del mantenimiento preventivo:

- Requiere invertir tiempo en planificación.
- La frecuencia de este mantenimiento puede necesitar ajustes.
- Curva de aprendizaje para los cambios en el flujo de trabajo.

3.6.2 Mantenimiento Predictivo

Es una estrategia de mantenimiento cuyo objetivo es prevenir averías. Basándose en los datos recogidos y en algoritmos predictivos predefinidos, intenta estimar cuándo se producirá una avería y en base a esto, se programan las actividades de mantenimiento en función de estas predicciones. Para realizar un buen mantenimiento predictivo, se distinguen 3 etapas principales:

1. **Recolección de datos (data collection):** El primer paso es recoger información en tiempo real sobre el rendimiento y el estado del equipo.
2. **Minería de datos (data mining):** Acumular datos no sirve de nada sin un buen tratamiento de estos, para extraer la información relevante, es por esto que se debe analizar la información extraída a partir de sensores, la cual es enviada a un sistema central o a un software, haciendo más eficaz y mucho más preciso este tipo de práctica.
3. **Cálculos y aprendizaje automático (machine learning):** Corresponde a una técnica sofisticada, que utiliza inteligencia artificial e información histórica de fallas para determinar anomalías, correlaciones o sugerencias inteligentes incluso antes de presentarse la avería o falla.

Ventajas del mantenimiento predictivo:

- Permite la toma de decisiones a tiempo, reduciendo el downtime y aumentando la disponibilidad de activos.
- Evita el desperdicio de existencias y mano de obra en mantenimientos innecesarios.
- Permite controlar mejor el presupuesto de mantenimiento.
- Utilización óptima del equipo durante todo el ciclo de vida.

Desventajas del mantenimiento predictivo:

- Altos costos asociados a la necesidad de invertir en equipos de monitoreo específicos, así como la necesidad de capacitar al personal para que interprete de buena manera los datos obtenidos.
- Para activos de baja criticidad este tipo de mantenimiento puede no ofrecer grandes ahorros en comparación con otras alternativas de mantenimiento.
- Resulta inadecuado para activos que presentan modos de fallas aleatorios o sin datos iniciales para predecir averías.

3.6.3 Mantenimiento Proactivo:

El mantenimiento proactivo es una estrategia de mantenimiento cuyo objetivo es determinar la causa raíz de los fallos de los equipos para corregirlos antes de que causen más problemas y provoquen averías en las máquinas. La aplicación de un mantenimiento proactivo en el lugar de trabajo puede impulsar la productividad, maximizar el uso de los activos y contribuir a la seguridad en el lugar de trabajo.

Por lo tanto, si se habla de esta estrategia en función de un mantenimiento pre-falla, se hace referencia a una estrategia de mantenimiento preventivo que trabaja para corregir las causas fundamentales de los fallos y evitar las averías causadas por las condiciones subyacentes del equipo, ya que, como se mencionó anteriormente, el propósito de este tipo de mantenimiento es ver los fallos como algo que puede anticiparse y eliminarse antes que se produzcan.

Por otro lado al hablar de esta estrategia de mantenimiento post-falla, resulta necesario realizar un análisis de mantenimiento correctivo, revisando todos los procesos involucrados en las mantenciones y realizando análisis causa-raíz, tomando las medidas necesarias para evitar los mismos problemas a futuro.

3.6.4 Mantenimiento Correctivo

Corresponde al tipo de mantenimiento que se realiza cuando un equipo o sistema presenta una falla funcional producto de causas desconocidas. Esta estrategia es ideal para equipos de baja prioridad, es decir, aquellos sin los cuales las operaciones de la empresa pueden continuar funcionando con normalidad. También se aplica a activos de poco valor, cuyo mantenimiento periódico podría terminar costando incluso más que una reparación o substitución.

Ventajas del mantenimiento correctivo:

- Planificación mínima requerida.
- Proceso sencillo de entender y llevar a cabo.
- Cuando los costos de parada y reparación en caso de fallo son menores que la inversión necesaria para mantenimiento preventivo, esta estrategia de mantenimiento resulta ser la mejor opción.

Desventajas del mantenimiento correctivo:

- Los fallos son impredecibles y pueden traer como consecuencia elevados costos de indisponibilidad de equipos.
- Puede reducir la vida útil del activo.
- Puede conllevar a costos más elevados a largo plazo.
- No permite programar ni planificar acciones para evitar la falla.
- Incertidumbre sobre cuándo ocurrirá la falla.

3.6.5 Mantenimiento Prescriptivo

El mantenimiento prescriptivo consiste en la evolución natural del mantenimiento predictivo, siendo hasta ahora la técnica más avanzada y compleja disponible. Va más allá de simplemente avisar que va a tener lugar un fallo, y es que, además, es capaz de aconsejar cuándo intervenir en función de las condiciones y los recursos disponibles, de manera que afecte lo menos posible al ritmo normal de producción.

Para conseguirlo, resuelve problemas matemáticos avanzados de optimización con restricciones impuestas por el contexto, obteniendo finalmente la solución o el conjunto de soluciones más óptima.

Para diferenciarlo del mantenimiento predictivo es útil entender que, si bien el mantenimiento predictivo puede detectar un riesgo en base a datos históricos y condiciones actuales del activo, este requiere de acción e intervención humana para procesar la información, tomar una decisión y generar la orden de trabajo necesaria. Mientras que por otro lado, el mantenimiento prescriptivo puede utilizar datos históricos y extraer modelos para ofrecer posibles escenarios, creando automáticamente una orden de trabajo en caso de ser necesaria y enviarla a la unidad correspondiente para realizar los trabajos de mantención requeridos.

3.7 Definición de Tiempos e Indicadores de Mantenimiento

3.7.1 ASARCO CMDIC

Como bien se detalla en el glosario, ASARCO corresponde a una abreviatura de "American Smelting & Refinering Co." y corresponde al marco de referencia mediante el cual se definen los conceptos y se distribuyen los tiempos en que el equipo, máquina o instalación incurren durante la operación.

<table>
<tr><th colspan="5">Tiempo Nominal</th></tr>
<tr><th colspan="4">Tiempo Disponible</th><th>Pannes</th></tr>
<tr><th colspan="2">Tiempo Operativo</th><th>Demoras Programadas</th><th>Reservas</th><th></th></tr>
<tr><td>Tiempo Efectivo</td><td>Demoras No Programadas</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Figura 3.17: ASARCO CMDIC, definición de tiempos en perforación. (fuente: Reunión arranque memoria CMDIC)

La figura 3.17 muestra la definición de tiempos ASARCO para perforadoras en CMDIC. A partir de esta parece relevante realizar un desglose en función de cada uno de los tiempos mencionados, el cual se muestra en la figura 3.18:

Efectivo	Demoras No Programadas	Demoras Programadas	Reservas	Pannes
• Perforando	• Aseo Maquinas • Atrapamiento de Aceros • Cambio Fila • Cambio Malla • Cambio Pozo • Corte Energía por Req. Operacional • Espera Relleno Agua • Incidente/Accidente • Movimiento de Cables • Operador en instrucción • Servicio Higénico • System off • Tricono Tapado	• Cambio Elemento de Perforación • Cambio Turno • Colación • Armado/Desarme Convoy • Inspección de Equipo • Relleno Aceite Tricono • Relleno de Agua • Relleno de combustible • Rotación De Barras • Traslado • Tronadura	• Condiciones Climáticas Adversas • Corte de Energías Externas • Espera Relleno Combustible • Espera Cama Baja • Preparación De Sitio Perforación • Requerimientos Operacionales • Reunión • Sin Cobertura GPS • Sin Marcas • Sin Operador • Sin Sitio de Perforación	• Panne de Mantención. • Panne Eléctrica. • Panne GSO • Panne Mantención Programada. • Panne Mecánica • Panne Operacional.

Figura 3.18: Descripción de tiempos de demoras, CMDIC. (fuente: Reunión arranque de memoria CMDIC)

3.7.2 Confiabilidad

Cuando se habla de confiabilidad, se hace referencia a la capacidad que tiene un equipo de realizar la función para la cual fue diseñada, en el contexto operacional correspondiente. Teniendo esto en cuenta, se puede encontrar en la literatura diversas maneras de calcular este parámetro. En CMDIC, particularmente en el área de mantención, de la Gerencia de Perforación, Tronadura y Desarrollo, se utiliza como indicador de confiabilidad el parámetro MTBF.

El MTBF (Mean Time Between Failures) o tiempo medio entre fallas es un parámetro que establece el periodo promedio entre dos fallas de un elemento en un contexto de funcionamiento dado.

3.7.3 Mantenibilidad

La mantenibilidad de un equipo hace referencia a la capacidad que tiene este de ser reparado y volver a estar operativo luego de una falla funcional. Tal como se mencionó respecto a la confiabilidad, particularmente en el área de mantención de la Gerencia de Perforación, Tronadura y Desarrollo, se utiliza como indicador de mantenibilidad el parámetro MTTR.

El MTTR (Mean Time to Repair) o tiempo medio para reparación es un parámetro que indica la relación entre el tiempo total de intervenciones por restauración, y el número total de reparaciones.

Este índice debe aplicarse a equipos cuyo tiempo de reparación es significativo con respecto al tiempo de operación.

Otro indicador a tener en cuenta es el MTTF (Mean Time to Failures) o tiempo medio de fallas, el cual corresponde al tiempo medio entre una falla y otra, con la suposición de que el sistema fallido no se repara inmediatamente, es decir, tiene en consideración el tiempo en que el activo deja de estar operativo.

Debido a lo anterior es posible encontrar una relación entre los 3 indicadores antes mencionados:

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{3.1}$$

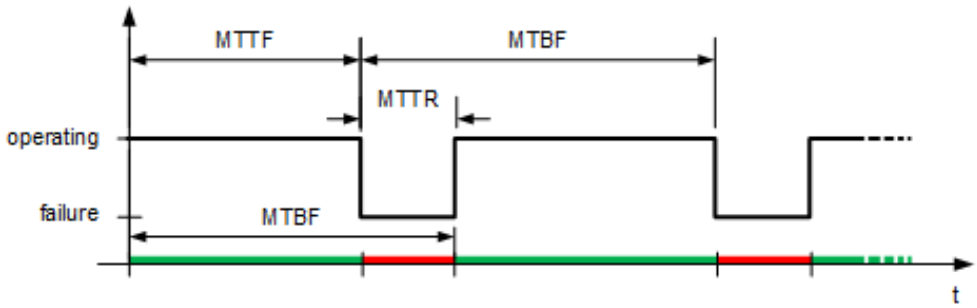

Figura 3.19: Esquema de relaciones entre MTBF, MTTR y MTTF. (fuente: support.maxongroup.com, Reliability analysis, Failure rate, MTBF)

3.8 Técnicas de Análisis de Fallas

3.8.1 Análisis de Pareto

El principio de Pareto establece que, en la mayoría de los casos, un problema es originado por un grupo pequeño de un total de posibles causas. El diagrama que surge como consecuencia de aplicar este principio se denomina Diagrama de Pareto, y permite identificar las causas de mayor importancia y magnitud capaces de provocar el efecto o inconveniente estudiado.

Según este principio, y en cualquier conjunto de elementos, eventos o causas, unos pocos factores son más significativos que el resto; razón por la cual se los llama "los pocos y significativos". También conocida como la regla 80-20, asegura que casi siempre existen pocas ($\approx 20\%$) causas que contribuyen mayoritariamente ($\approx 80\%$) a generar el efecto total. A las causas pocas y significativas se les conoce también como *causas vitales*; dejando el término *causas triviales* para el 80% restante. Así, el 80% de las causas serían responsables de contribuir sólo en un 20% al problema total.

Si trasladamos el principio de Pareto a la industria, podríamos asegurar, por ejemplo, que el 80% de las pérdidas de un equipo o instalación serían producidas sólo por el 20% del total posible de causas o modos de falla.

Un diagrama de Pareto es útil para estudiar fallas crónicas (más relacionadas con las oportunidades de mejora que con los problemas). Sin embargo, y bajo ninguna circunstancia, resuelve los problemas; únicamente facilita la selección de las causas que producen el mayor perjuicio.

Los pasos para construir un diagrama de Pareto son los siguientes:

- Definir el problema a estudiar, su alcance y los límites del sistema (o proceso).
- Escoger una unidad de medida para cuantificar, por igual, el efecto o pérdida de todos los eventos (o causas).
- Listar todos los eventos (o causas) y la pérdida parcial con que contribuye cada uno.
- Sumar las pérdidas parciales para obtener la pérdida total del conjunto.
- Ordenar los eventos (o causas) descendentemente según la pérdida que provoca cada uno.
- Calcular el porcentaje que representa cada evento (causa) con respecto al total (100%).
- Hacer la suma acumulada de las contribuciones porcentuales, desde la mayor a la menor.
- Confeccionar un diagrama de barras con la pérdida de cada evento (o causa) ordenado descendentemente. En el mismo gráfico, y como eje secundario del lado derecho, dibujar una línea cuyos puntos serán los porcentajes acumulados en orden ascendente.
- Seleccionar los eventos (o causas) cuya suma acumulada sea igual o mayor al 80% de la pérdida total. El conjunto de tales eventos constituye los pocos y significativos.
- Los planes de acción deben enfocarse, en principio, a eliminar las causas vitales, por último las triviales.

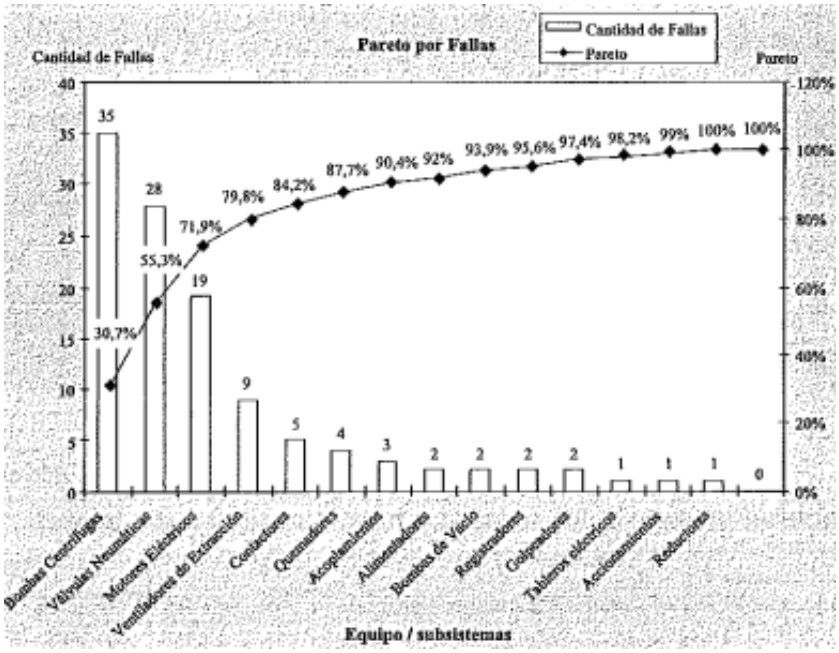

Figura 3.20: Ejemplo de diagrama de Pareto, organizado según cantidad de fallas. (fuente: Manual de Mantenimiento, Alejandro Pistarelli)

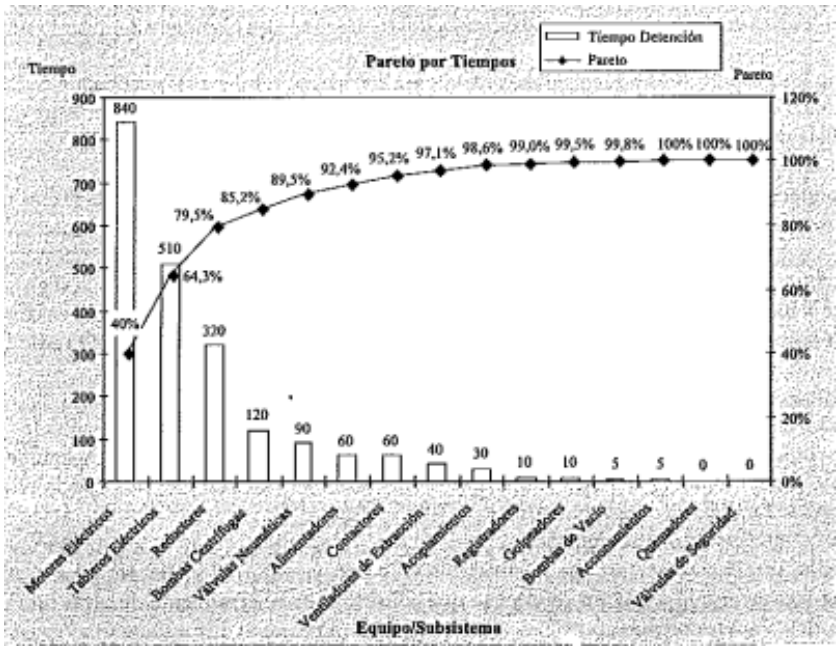

Figura 3.21: Ejemplo de diagrama de Pareto, organizado según horas de mantenimiento. (fuente: Manual de Mantenimiento, Alejandro Pistarelli)

3.8.2 Análisis de Jack Knife

El método de Jack Knife es una técnica utilizada para analizar el tiempo de inactividad o indisponibilidad de equipos o sistemas usando diagramas de dispersión. Una de las principales ventajas de este análisis es que aporta información respecto a la criticidad de la falla, considerando dos parámetros fundamentales, MTTR y cantidad de detenciones. En base a lo anterior se puede determinar la gravedad o criticidad de la falla teniendo en consideración el tiempo que tarda en ser reparada una falla y la recurrencia o periodicidad de las fallas. Según el autor Peter F. Knights, las fallas se pueden clasificar en cuatro grupos:

- **Fallas Bajo Control:** Son fallas fáciles de reparar y que no se presentan muy seguido. Para efectos del presente análisis, estas fallas serán llamadas **"fallas leves"**.
- **Fallas Agudas:** Fallas poco habituales, pero de difícil reparación (alto MTTR).
- **Fallas Crónicas:** Son fallas de fácil reparación, pero su principal problema es que se presentan con mucha recurrencia.
- **Fallas Agudas-Crónicas:** Estas son las fallas más graves, ya que se presentan muy seguido y son de difícil reparación. Este tipo de fallas serán mencionadas más adelante como **"fallas críticas"**.

Para confeccionar un diagrama de Jack Knife se realiza un diagrama de dispersión en escala logarítmica, representando la cantidad de detenciones (N) vs MTTR. Por otro lado, para determinar la criticidad de las fallas se definen 4 cuadrantes, añadiendo valores límites de MTTR y N, los cuales se obtienen de la siguiente manera:

- **Límite MTTR:** Corresponde al cuociente entre el tiempo de mantención y la cantidad de detenciones totales por equipo. El límite MTTR corresponde al MTTR del propio equipo en análisis y sirve como referencia para observar la magnitud de los MTTR de cada sistema o subsistema en función del MTTR global del equipo.

$$Limite \quad MTTR = \frac{tiempo \quad total \quad de \quad mantenimiento}{cant. \quad total \quad de \quad detenciones} \tag{3.2}$$

- **Límite N:** Este parámetro se obtiene al realizar la división entre la cantidad de sistemas o subsistemas totales del equipo y la cantidad de sistemas o subsistemas que presentan falla

$$Límite \quad n = \frac{Cant. \quad de \quad detenciones}{nro. \quad de \quad elementos \quad de \quad falla} \tag{3.3}$$

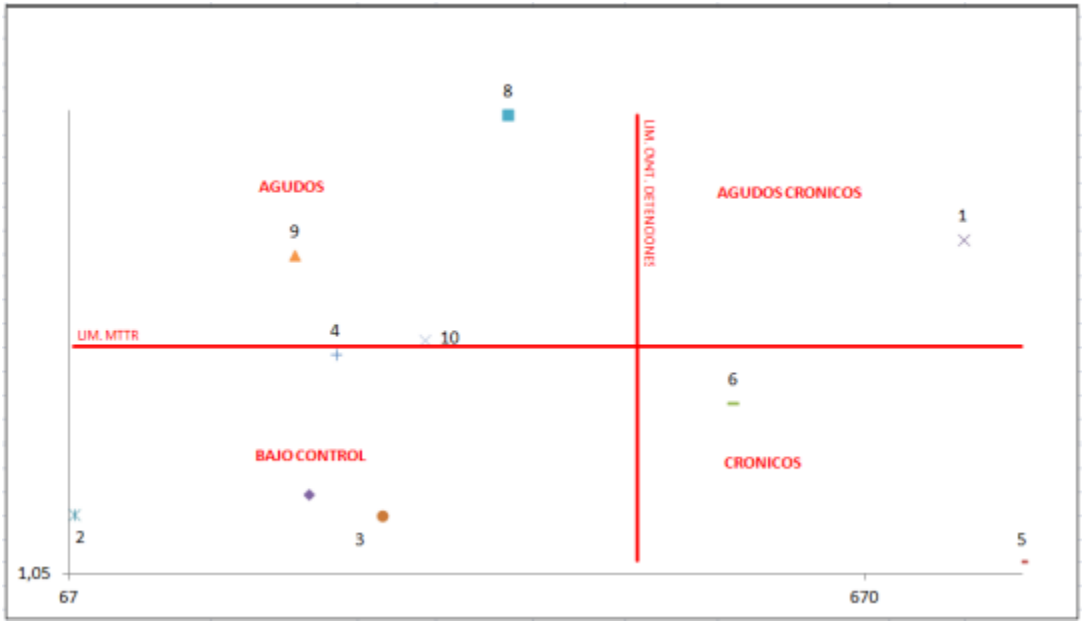

Figura 3.22: Ejemplo de diagrama de disprsión Jack Knife, con límites MTTR y N. (fuente: Down time Priorities, Jack Knife Diagrams and the Businnes Cycle, Peter F Knights Centro de Minería, PUC)

3.8.3 Análisis Causa-Raíz de Falla (RCA)

Una técnica muy difundida por su eficacia para resolver problemas complejos es el análisis RCA (Root Cause Analysis). Se trata de un proceso estructurado y deductivo que sirve para identificar las causas primarias (raíces) que desencadenan una falla funcional, problema o incidente. Es un análisis *post-morten*, ya que nada puede hacerse para evitar la consecuencia sucedida. Sin embargo, es de gran ayuda para impedir su recurrencia.

Siendo el funcionamiento de los sistemas productivos cada vez mas complejo, se impone contar con tecnologías efectivas capaces de identificar las relaciones causales que conducen a la falla de los sistemas. Hace un tiempo era suficiente responder un par de preguntas acerca de cuáles podría haber sido los orígenes de un evento. Hoy día, sin embargo, es preciso utilizar métodos que garanticen que todas las posibles causas de un evento sean tomadas en cuenta. El análisis RCA brinda la posibilidad de atacar las causas y no concentrarse sólo en los síntomas. Es más tentador enfocarse en los síntomas de la falla y no en las causas que la provocan

El análisis causa-raíz es una herramienta estructurada que permite aumentar o mantener la confiabilidad de los sistemas productivos poniendo de manifiesto las causas raíces tanto de fallas crónicas (recurrentes) como de esporádicas. Puede aplicarse junto a otras herramientas de gestión

de activos como el RCM[3]. Por ejemplo, durante el análisis RCM el grupo de trabajo determina los modos de falla capaces de provocar una falla funcional, hayan sucedido o no. Además, se propone la estrategia (tipos y tareas de mantenimiento) que evitaría esos modos de falla o, al menos, mitigaría sus potenciales consecuencias. Sin embargo, pueden aún aparecer fallas funcionales inesperadas cuyas consecuencias no sean toleradas por la organización. Para estos casos, se torna aplicable un *análisis causa-raíz de falla*.

Un análisis causa raíz se utiliza, básicamente, para:

- Eliminar fallas crónicas que, por su alta frecuencia, producen pérdidas considerables.
- Evitar la recurrencia de fallas esporádicas.
- Corregir errores humanos durante los procesos de operación, mantenimiento, etc.; sin la búsqueda de responsables (o culpables).
- Resolver problemas de cualquier índole que estén afectando a la organización.
- Investigar las causas de un accidente (o incidente).
- Investigar los orígenes de una falla funcional luego de aplicar otros métodos de gestión de activos como RCM o TPM[4].

A continuación se detallan brevemente las etapas para realizar un RCA:

1. **Identificar:** En esta etapa se deben identificar los problemas que merecen ser analizados con RCA, realizando un listado con las fallas y luego se debe clasificar y cuantificar dichos problemas o fallas. En este punto resulta práctico utilizar un diagrama de Pareto para jerarquizar dichas fallas.
2. **Investigar:** En este punto es sumamente importante seleccionar al personal idóneo, el cual debe conocer en profundidad el proceso, sistema, instalación o equipo a estudiar. El personal debe reunir toda la información relacionada a la falla en estudio, teniendo en cuenta el contexto operativo correspondiente.
3. **Analizar:** Basándose en la información obtenida en el paso anterior, en este punto se deben deducir las verdaderas causas que originan el problema. Con la información reunida por el grupo, y con ayuda de un *árbol lógico*, se arma la estructura descendente efecto-causa que

[3]Reliability centred maintenance (mantenimiento centrado en confiabilidad)
[4]Total productive maintenance (mantenimiento productivo total)

conduce a los orígenes de la falla.

Se debe comenzar con une breve descripción del problema o falla funcional y luego avanzar sobre una línea deductiva múltiple, como se muestra en la figura 3.23:

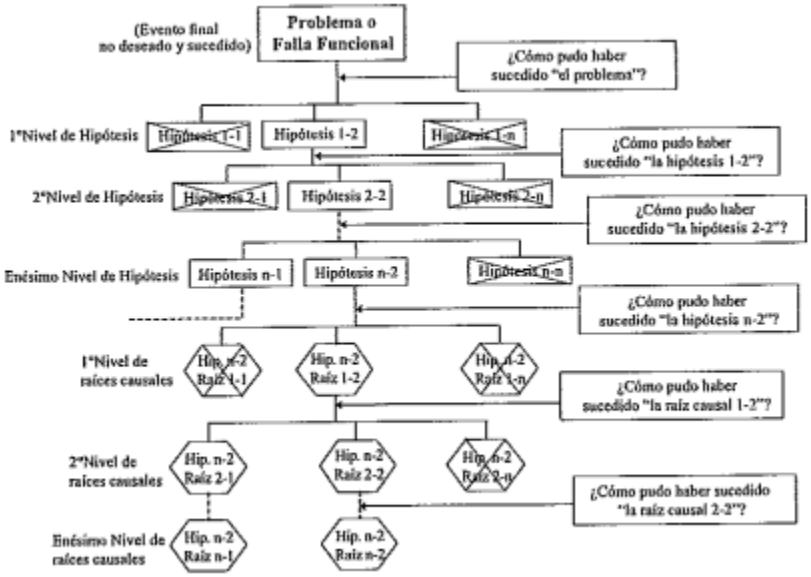

Figura 3.23: Diagrama con estructura de un árbol lógico para análisis RCA (fuente: Manual de Mantenimiento, Alejandro Pistarelli.

3.8.4 Curva de la Bañera

El rendimiento de cada activo varía a lo largo de su vida, hasta que finalmente llega a la edad de ser reemplazado. Hay varios indicadores que permiten seguir esta evolución, como la densidad de probabilidad de fallo, la tasa de fallos y la probabilidad acumulada de fallo. En esta línea, se destaca la posibilidad de realizar un análisis del equipo en función de su vida útil, conocido como "curva de la bañera".

Esta función representa la probabilidad de que un determinado activo falle a lo largo del tiempo y permite distinguir claramente tres fases distintas en el ciclo de vida del equipo, como se puede ver en la figura 3.24. Conocer bien estas tres fases permite adaptar el plan de mantenimiento a lo largo de la vida del equipo.

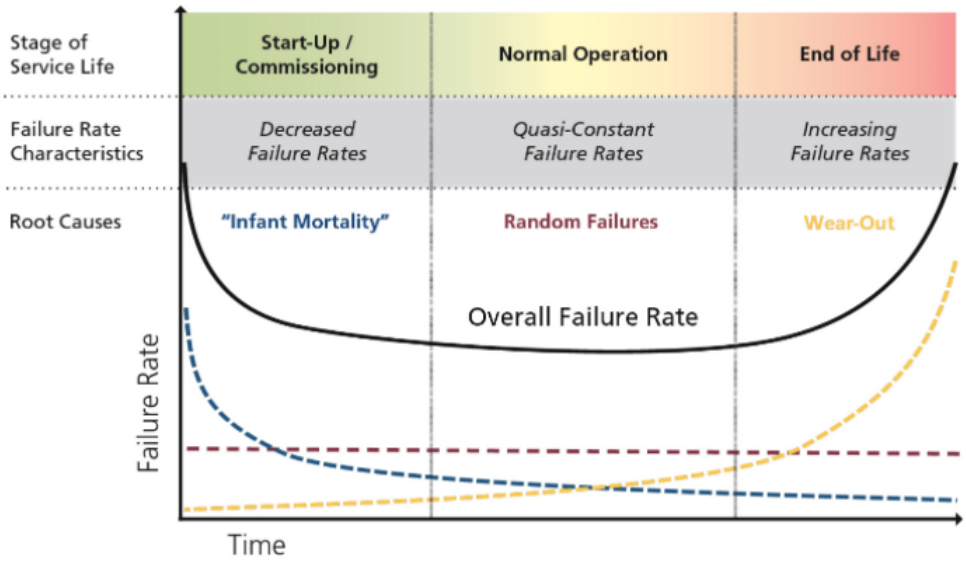

Figura 3.24: Ejemplo curva de la bañera. (fuente: blog.infraspeak.com)

Comprender la curva de la bañera permite, en primer lugar, determinar la vida útil de un activo, su fiabilidad y mantenerlo bajo control. Pero la principal ventaja es, sin duda, poder planificar mejor cómo y cuándo realizar el mantenimiento. El objetivo final, como siempre, es prolongar la vida útil del activo y aumentar su disponibilidad sin un mantenimiento innecesario.

En esta curva se pueden distinguir claramente tres etapas en la vida útil del activo, la cuales son:

1. **Activo Nuevo:** Cuando el activo es nuevo suele ocurrir un fenómeno llamado **"mortalidad infantil"**, caracterizado por una alta tasa de fallas, la cual puede ser consecuencia de:

    - Problemas en el diseño
    - Falta de control de calidad
    - Errores de instalación
    - Defectos de fabricación
    - Componentes inadecuados
    - Funcionamiento insuficiente

    Para evitar la mortalidad infantil en activos, se pueden seguir los siguientes consejos:

    - **Depuración:** Pruebas preliminares con tecnologías automáticas y sensores, con la finalidad de desechar o reparar el equipo antes de salir de fábrica.

- **Pruebas de aceptación y fiabilidad:** Realizar reevaluaciones del equipo siempre que haya cambio de componentes, modificaciones en el diseño, en las herramientas o procesos, entre otros.
- **Control de calidad:** Utilizar técnicas de detección temprana de fallos, como el análisis de vibraciones, para detectar problemas en el equipo y evitar llegar al fallo funcional.
- **Pruebas aceleradas y pruebas burn-in:** Estas pruebas consisten en someter al equipo a condiciones de trabajo iguales o más exigentes que las normales, para observar su comportamiento en estrés o para medir los resultados obtenidos en un tiempo determinado.

Recomendación: En esta etapa se recomienda realizar mantenimento correctivo, con la finalidad de solucionar estas fallas producidas y evitar que vuelvan a ocurrir.

2. **Activo Maduro:** Cuando el activo es maduro la tasa de fallas se estabiliza, debido a que el personal tiene claro el uso del equipo (disminuyendo las fallas operacionales) y además, en este punto las fallas de fabricación ya fueron corregidas. Durante esta etapa de la vida útil del activo los fallos son aleatorios y pueden producirse por las siguientes razones:

   - Errores humanos.
   - Fallas naturales.
   - Uso excesivo o sobrecarga.
   - Daños accidentales.

   En este punto, la tasa de fallas y el MTBF deberían ser inversamente proporcionales.

   Recomendación: En esta etapa se recomienda lo siguiente:

   - Realizar revisiones periódicas según fabricante.
   - Mantenimiento preventivo.
   - Mantenimiento predictivo, para predecir cuándo se producirá una inflexión en la curva y se entrará en la fase 3.

3. **Activo Viejo:** En esta etapa, el equipo comienza a aumentar su tasa de fallas de manera progresiva, debido a:

   - Desgaste progresivo de los componentes.
   - Mantenimiento deficiente.

- Revisiones incorrectas.

Cabe destacar que en este punto las reparaciones son cada vez más costosas y los riesgos de seguridad son cada vez mayores.

Recomendación: En esta etapa se recomienda realizar mantenimiento preventivo, ya que se considera como el más eficaz teniendo en cuenta la seguridad del activo y para prolongar su vida útil. Lo ideal en este caso es adoptar nuevas medidas de mantenimiento preventivo apenas se observe un aumento en la tasa de fallas, evitando de esta manera un aumento brusco de esta y mantener la tasa de fallas constante o lo más cercana posible a la tasa observada en la fase 2 (equipo maduro).

3.9 Modelos de Distribución

3.9.1 Definiciones

Existen diversas modelos probabilísitos de distribución que sirven para modelar el comportamiento de un conjunto de datos. Estos modelos se pueden dividir en dos grandes grupos, el primer grupo corresponde a modelos que utilizan variables aleatorias discretas, mientras que el segundo grupo estudia variables aleatorias continuas.

Definición: Sea X una variable aleatoria continua. Entonces, una **distribución de probabilidad** o **función de densidad de probabilidad** (fdp) de X es una función f(x) tal que para dos números cualesquiera a y b con a≤b, se tiene:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \tag{3.4}$$

Es decir, la probabilidad de que X asuma un valor en el intervalo [a,b] es el área sobre este intervalo y bajo la gráfica de la función de densidad, como se ilustra en la figura 3.25. La gráfica f(x) a menudo se conoce como **curva de densidad**.

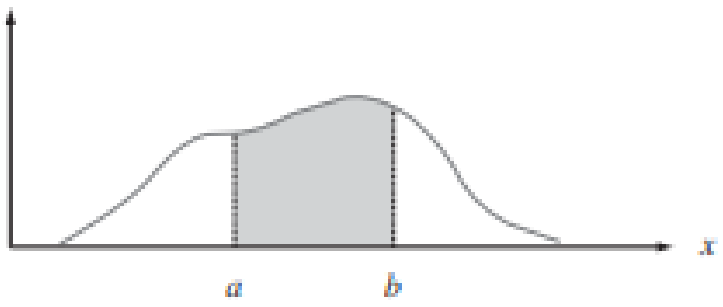

Figura 3.25: P(a $\leq$ X $\leq$ b) = área debajo de la curva de densidad entre a y b. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore)

Para que f(x) sea una función de probabilidad legítima, debe satisfacer las siguientes condiciones:

1. f(x) $\geq$ 0 para todo x
2. $\int_{-\infty}^{\infty}$ f(x)dx = 1 = área bajo la curva f(x)

3.9.2 Modelos para Variables Aleatorias Discretas

En el presente documento no se estudiará en profundidad este tipo de distribuciones, ya que no son de ayuda para el caso práctico en análisis. A continuación se mencionan algunas de las distribuciones de probabilidad con variables aleatorias discretas más utilizadas:

- Distribución de Bernoulli
- Distribución Binomial
- Distribución Hipergeométrica
- Distribución Geométrica
- Distribución Binomial negativa

3.9.3 Modelos para Variables Aleatorias Continuas

Este tipo de modelo es utilizado ampliamente en el área de confiabilidad, y la variable aleatoria continua a utilizar en este tipo de caso particular, es el tiempo. A continuación se detallan los modelos de distribución más utilizados para este fin.

Distribución Normal

La distribución normal es la más importante en toda la probabilidad y estadística. Muchas poblaciones numéricas tienen distribuciones que pueden ser representadas muy fielmente por una curva normal apropiada. Incluso cuando la distribución subyacente es discreta, la curva normal a menudo da una excelente aproximación.

Definición: Se dice que una variable aleatoria continua X tiene una distribución normal con parámetros μ y σ (o μ y σ^2), donde $-\infty < \mu < \infty$ y $\sigma < 0$, si la función de probabilidad de X es:

$$f(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \qquad con - \infty < x < \infty \tag{3.5}$$

donde:

- μ : Media de X
- σ^2 : Desviación estándar de X

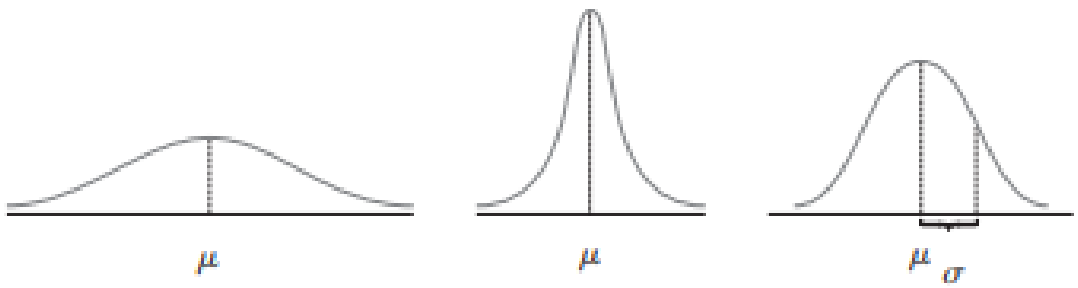

Figura 3.26: Ejemplos de funciones de densidad de probabilidad normales. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore)

Distribución Exponencial

La curva de densidad correspondiente a cualquier distribución normal tiene forma de campana y por consiguiente es simétrica. Existen muchas situaciones prácticas en las cuales la variable de interés para un investigador podría tener una distribución asimétrica.

La familia de distribuciones exponenciales proporciona modelos de probabilidad que son muy utilizados en disciplinas de ingeniería y ciencias.

Definición: Se dice que X tiene una distribución exponencial con parámetro λ ($\lambda > 0$) si la función de densidad de probabilidad de X es:

$$f(x;\lambda) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & \text{en todo otro caso} \end{cases} \tag{3.6}$$

Tanto la media como la desviación estándar de la distribución exponencial son iguales a $1/\lambda$. En la figura 3.27 aparecen algunas gráficas de varias funciones de densidad de probabilidad exponenciales.

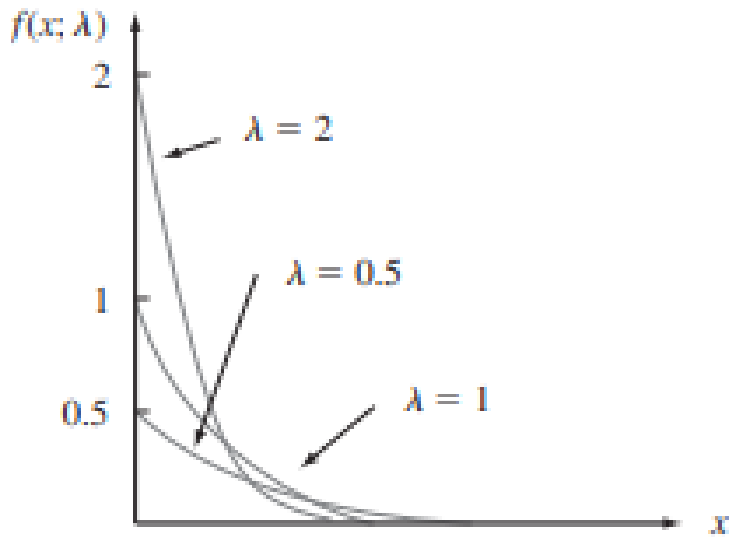

Figura 3.27: Ejemplos de funciones de densidad de probabilidad exponenciales. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore)

Distribución Lognormal

Definición: Se dice que una variable aleatoria no negativa X tiene una distribución lognormal si la variable aleatoria Y=Ln(X) tiene una distribución normal. La función de densidad de probabilidad resultante de una variable aleatoria lognormal cuando el Ln(X) está normalmente distribuido con parámetros μ y σ es:

$$f(x;\mu,\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \cdot e^{-[ln(x)-\mu]^2/(2\sigma^2)} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \tag{3.7}$$

Hay que tener en cuenta que los parámetros μ y σ no son la media y la desviación estándar de X, sino de Ln(X).

Como Ln(X) tiene una distribución normal, la función de distribución acumulativa de X puede

ser expresada en términos de la función de distribución acumulativa Φ(z) de una variable aleatoria normal estándar Z.

$$F(x;\mu,\sigma) = P(X \leq x) = P[ln(X) \leq ln(x)] = P(Z \leq \frac{ln(x)-\mu}{\sigma}) = \Phi(\frac{ln(x)-\mu}{\sigma}), x > 0 \quad (3.8)$$

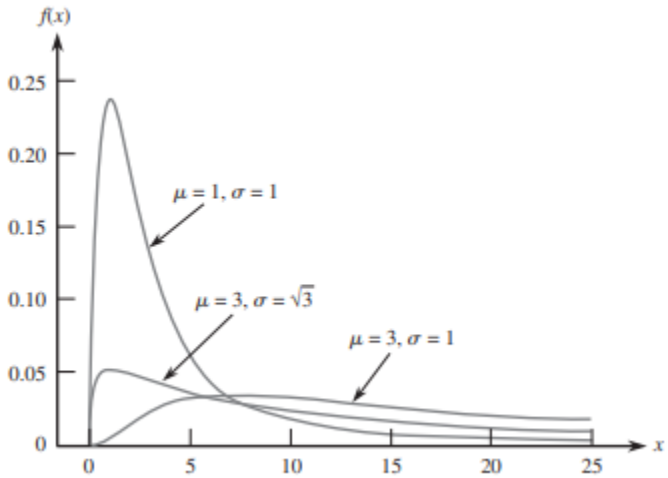

Figura 3.28: Ejemplos de densidad de probabilidad lognormales. (fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Jay L. Devore)

Distribución de Weibull

Las familias de distribuciones antes mencionadas proporcionan una amplia variedad de modelos de probabilidad de variables continuas, pero existen muchas situaciones prácticas en las cuales ningún miembro de estas familias se adapta bien al conjunto de datos observados. A raíz de esto surgen otras familias de distribuciones que se pueden adaptar de mejor manera a casos prácticos, como lo es la distribución de Weibull. Esta distribución es usada en estudios de confiabilidad, especialmente de sistemas mecánicos. Tiene la ventaja de ser muy flexible, y adaptable a una variedad de observaciones experimentales.

Definición: Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución Weibull con parámetros β, η y γ ($\beta > 0$, $\eta > 0$) si la función de densidad de probabilidad de X es:

$$f(x;\beta,\eta,\gamma) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot (x-\gamma)^{\beta-1} \cdot e^{-((x-\gamma)/\eta)^\beta} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

La función de distribución acumulativa de una variable aleatoria de weibull con parámetros β, η y γ es:

$$F(x;\beta,\eta,\gamma) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 - e^{-((x-\gamma)/\eta)^{\beta}} & x \geq 0 \end{cases} \tag{3.10}$$

Los parámetros o variables presentadas en la ecuación 3.10 tienen nombre propio, debido al efecto que estos producen en la distribución, como se puede observar a continuación:

- **β:** Parámetro de forma. Es el parámetro encargado de, como su nombre bien lo indica, ajustar la forma de la curva de acuerdo a la distribución más adecuada.
- **η:** Parámetro de escala o vida característica. Este parámetro indica la vida u horas donde falla el 63,2% de los componentes en estudio.
- **γ:** Vida asegurada o predesgaste. Este parámetro describe un movimiento de la curva hacia la derecha o izquierda alejándose del valor "0".

3.9.4 Distribución de Weibull a Partir de Base de Datos

Como se mencionó anteriormente, la distribución de Weibull es la más utilizada para análisis referentes al área de mantenimiento en general, debido a su capacidad de adaptar su forma a otras distribuciones de acuerdo al valor de sus parámetros característicos. Es por esto que resulta importante entender cómo se puede realizar un análisis de este tipo en función de una base de datos histórica, procedimiento que dará pie al análisis de datos necesario para el desarrollo de la presente memoria.

Como se mencionó en capítulos anteriores, la confiabilidad de un equipo corresponde a la capacidad que este tiene para realizar la función para la cual fue diseñado, en el contexto operacional correspondiente. Al tener una base de datos histórica para un equipo o componente en específico, se puede decir que en términos numéricos, es posible representar la confiabilidad de dicho elemento por una distribución de Weibull. En la ecuación 3.10 se muestra la distribución acumulativa de una variable aleatoria distribuida mediante Weibull, si se determina que la variable aleatoria a analizar es el tiempo y considerando el valor de γ=0 (valor que se utilizará en el futuro análisis), la ecuación puede quedar de la siguiente manera:

$$F(t;\beta,\eta) = 1 - e^{-(t/\eta)^{\beta}} \tag{3.11}$$

La ecuación 3.11 muestra la probabilidad de falla obtenida de acuerdo a una distribución de Weibull, a lo cual se le podría llamar **desconfiabilidad**[5] del componente o equipo analizado. Al hablar en términos probabilísticos, se puede decir que la confiabilidad se refiere a la probabilidad que tiene un activo de no fallar (puede cumplir sus funciones) mientras que la desconfiabilidad corresponde a la probabilidad que tiene el activo de fallar (es incapaz de cumplir sus funciones). Numéricamente se dice que:

$$R(t) + F(t) = 1 \tag{3.12}$$

Donde:

- **R(t):** Confiabilidad del activo o probabilidad de que este no falle.
- **F(t):** Desconfiabilidad del activo o probabilidad de que este presente una falla funcional.

La ecuación 3.12 indica que la probabilidad de falla de un activo sumado a la probabilidad de que no falle es igual a 1, o lo que es lo mismo, 100%. Por lo tanto, al utilizar la relación de la ecuación 3.12 en la ecuación 3.11 se puede decir que la confiabilidad de un componente en función del tiempo puede distribuirse de acuerdo a Weibull como se muestra a continuación:

$$R(t; \beta, \eta) = e^{-(t/\eta)^{\beta}} \tag{3.13}$$

La ecuación 3.13 representa la confiabilidad del activo, de acuerdo a una distribución de Weibull de dos parámetros (β y η). Teniendo en cuanta esta relación, el siguiente paso es determinar el valor de dichos parámetros a partir de una base de datos histórica de fallas.

Obtención de Regresión Lineal y Determinación de Parámetros de Weibull

A partir de la ecuación 3.11, luego de despejar términos y aplicar dos veces logaritmo natural, se llega a la siguiente expresión:

$$Ln[Ln(\frac{1}{1 - F(t)})] = \beta Ln(\frac{t}{\eta}) \tag{3.14}$$

La ecuación anterior (3.14) luego de ser trabajada queda de la siguiente forma:

$$Ln[Ln(\frac{1}{1 - F(t)})] = \beta Ln(t) - \beta Ln(\eta) \tag{3.15}$$

[5]La desconfiabilidad es lo opuesto a la confiabilidad, es decir, si la confiabilidad representa la capacidad del activo para cumplir una función específica, la desconfiabilidad hace referencia a la posibilidad de no cumplir con dicha función

La ecuación 3.15 corresponde a una ecuación lineal de la forma:

$$y = ax + b \tag{3.16}$$

Donde:

- y = Ln[Ln($\frac{1}{1-F(t)}$)]
- x = Ln(t)
- b = -β Lnη

Es posible observar en las ecuaciones 3.15 y 3.16, que la pendiente de la recta obtenida corresponde al parámetro de forma β.

De la relación anterior también es posible obtener el valor de η, el cual quedaría definido en función de la pendiente y del intercepto en el eje y (valor de "b") del gráfico de regresión, la relación entre estos parámetros se muestra en la ecuación 3.17:

$$\eta = e^{-\frac{b}{\beta}} \tag{3.17}$$

Procedimiento:

Conociendo estas relaciones, el procedimiento para obtener la regresión lineal para una distribución de Weibull de dos parámetros (β y η) a partir de una base de datos histórica es el siguiente:

1. Ordenar los horómetros de falla en orden ascendente.
2. Enumerar las fallas para valores de i desde 1 a n.
3. Se estima la función de probabilidad para cada falla (F(i)). Si la muestra es pequeña (n<100) se puede estimar mediante el método de rangos medianos o el método de rangos medios:

$$\textbf{Rangos Medianos (RM):} \quad F(i) \approx \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \tag{3.18}$$

$$\textbf{Rangos Medios (rm):} \quad F(i) \approx \frac{1}{n + 1} \tag{3.19}$$

4. Para los valores del eje ”x” se debe calcular logaritmo natural del horómetro de cambio de componente (Ln(t)).

5. Para los valores del eje ”y” se debe calcular ”Ln[-Ln(1-F(t))]”.

6. Graficar los datos en un diagrama de dispersión.

7. Obtener la línea de tendencia, la cual entregará información de la pendiente y el intercepto con el eje y.

8. Reemplazar valores de pendiente e intercepto en la ecuación 3.17 para obtener el valor de vida característica (η).

9. Reemplazar valores β y η en la ecuación 3.13 para obtener la curva de confiabilidad.

Tabla 3.1: Ejemplo de tabla de datos requerida para regresión lineal. (fuente: elaboración propia)

	Horas	**RM [F(t)]**	**X [Ln(t)]**	**Y [Ln(-Ln(1-F(t))]**
1	1.753	0,094594595	7,469009724	-2,308880127
2	1.898	0,22972973	7,54877724	-1,343181902
3	6.011	0,364864865	8,701419599	-0,789839834
4	9.229	0,5	9,130147153	-0,366512921
5	35.962	0,635135135	10,49021746	0,00819456
6	39.518	0,77027027	10,58450456	0,385841654
7	44.291	0,905405405	10,6985368	0,85787951

La tabla 3.1 muestra un ejemplo de como se deberían visualizar los datos de acuerdo al procedimiento antes planteado, utilizando rangos medianos para estimar la probabilidad de cada dato de falla.

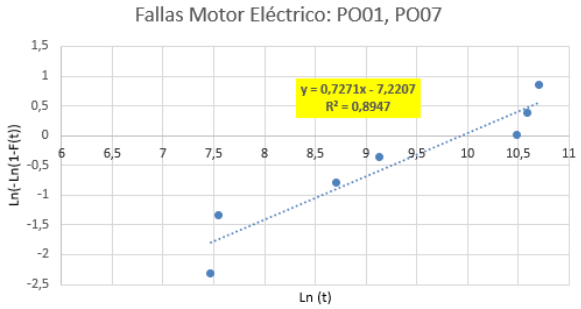

Figura 3.29: Ejemplo de regresión lineal. (fuente: elaboración propia)

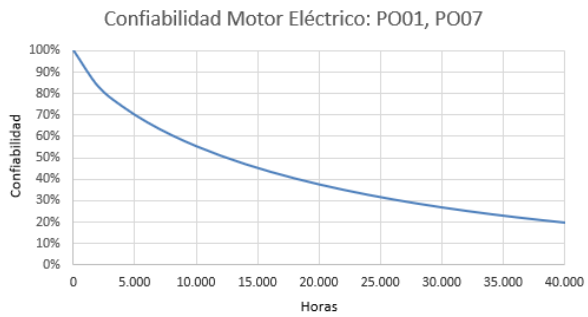

Figura 3.30: Ejemplo de curva de confiabilidad usando distribución de Weibull de dos parámetros. (fuente: elaboración propia)

Las figuras 3.29 y 3.30 muestran ejemplos de cómo deberían verse el gráfico de regresión lineal y la curva de confiabilidad al seguir los pasos especificados en el procedimiento antes señalado.

3.9.5 Obtención de MTBF y Tasa de Fallas a Partir de Weibull

Tasa de Fallas

El definir de buena manera los parámetros característicos de la distribución de Weibull es sumamente importante, ya que además de ser necesarios para obtener la curva de confiabilidad, estos pueden ser de gran utilidad para calcular otros indicadores relevantes para el área de mantenimiento.

En primer lugar se puede obtener la tasa de fallas, la cual representa la frecuencia con la cual se presenta un fallo funcional en el activo. Al tener conocimiento de los parámetros característicos de Weibull resulta sencillo calcular la tasa de fallos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{\beta}{\eta} \cdot (\frac{t}{\eta})^{\beta-1} \tag{3.20}$$

Donde:

- λ = Tasa de fallas.
- β = Parámetro de forma (obtenido a partir de la distribución de Weibull).
- η = Parámetro de escala o vida característica (obtenido a partir de la distribución de Weibull).
- t = Tiempo, corresponde a la variable aleatoria analizada.

Función Gamma y MTBF

La función Gamma aparece en varias funciones de distribución de probabilidad, por lo que es bastante usada tanto en probabilidad y estadística como en combinatoria.

En matemáticas, la función Gamma ($\Gamma(z)$) es una función que extiende el concepto de factorial a los números complejos. La notación fue ideada por Adrien-Marie Legendre. Si la parte real del número complejo z es positivo, entonces la integral de la ecuación 3.21 converge absolutamente. Esta integral puede ser extendida a todo el plano complejo excepto a los enteros negativos y al cero.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \tag{3.21}$$

Si n es un entero positivo, entonces la ecuación 3.22 puede demostrar la relación de esta función con el factorial. De hecho, la función Gamma generaliza el factorial para cualquier valor complejo de n.

$$\Gamma(n) = (n-1)! \tag{3.22}$$

Una buena manera para obtener el MTBF a partir de una base de datos histórica es utilizar la función Gamma en combinación con los parámetros característicos de Weibull, como se muestra en la ecuación 3.23:

$$MTBF = \gamma + \eta \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \tag{3.23}$$

Donde:

- γ = Parámetro de pre-desgaste o vida asegurada, según de distribución de Weibull.
- η = Vida característica o parámetro de escala, según distribución de Weibull.
- β = Parámetro de forma, según distribución de Weibull.
- Γ = Función Gamma.

3.9.6 Patrones de Tasas de Fallas

En 1.978 se escribió un reporte denominado "Reliability Centered Maintenance", por los autores F. Stanley Nowlan y Howard F. Heap. Reporte generado para United Airlines, usando datos de fallas de componentes de sus aviones.

Los resultados de este reporte son enormemente reconocidos en el área de confiabilidad, ya que los autores lograron identificar 6 patrones de fallos, los cuales se presentan a continuación:

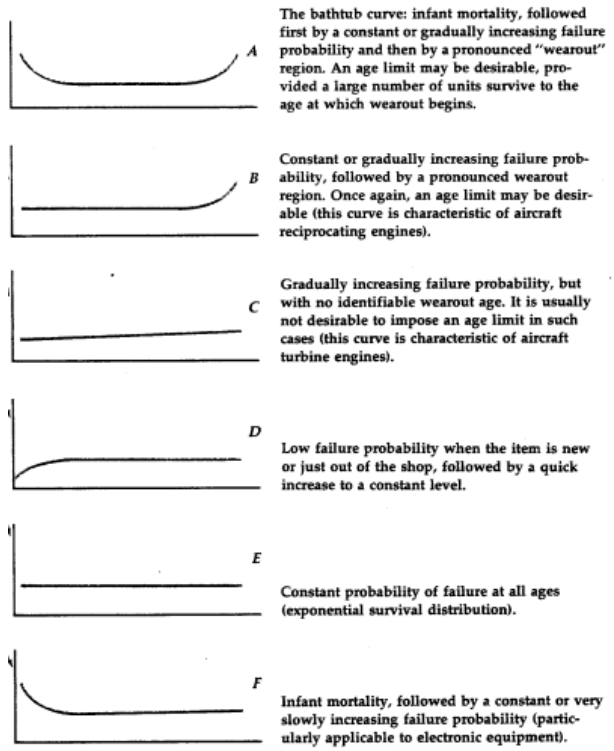

Figura 3.31: Patrones de probabilidad acumulada de fallos. (fuente: Reliability Centered Maintenance, Nowlan & Heap)

Los patrones presentados en la figura 3.31 describen lo siguiente:

- Los patrones A y B presentan un incremento en la tasa de fallos constante o gradual, seguido de una pronunciada zona de desgaste y por tanto una edad límite puede ser deseable.
- El patrón C viene descrito con un incremento gradual de la tasa de fallo, pero no se identifica una zona de deterioro. Usualmente no sería deseable imponer una edad límite.
- El patrón D se caracteriza por una baja tasa de fallo cuando el componente es nuevo, seguido de un rápido incremento a un nivel constante.
- El patrón E presenta una tasa de fallo constante en todas las edades (función de supervivencia exponencial).
- El patrón F, presenta mortalidad infantil, seguido por una tasa de fallas constante o con muy bajo incremento.

Capítulo 4

Desarrollo

4.1 Análisis de datos

Para comenzar el análisis, se cuenta con una base de datos que contiene información de las fallas para la flota de perforadoras, con información comprendida entre septiembre de 2020 y diciembre de 2021. La información indexada y contenida en esta base de datos es la siguiente:

- **Fecha:** Fecha de inicio de la falla.
- **Equipo:** Equipo de perforación que presenta falla.
- **Estado:** Tipo de detención, esta puede ser: operativa, panne o mantención programada (PM).
- **Fase:** Terreno o zona de la mina donde se encuentra el equipo.
- **Hora inicio:** Hora de inicio de la falla.
- **Hora fin:** Hora de finalización de intervenciones o mantenciones.
- **Duración:** Duración de mantenimiento.
- **Código dispatch:** Código asociado al modo de falla, obtenido del árbol de fallas.
- **Tipo de falla.**
- **Sistema.**
- **Subsistema.**
- **Síntoma:** Síntoma observado por el personal, el cual da origen a la necesidad de mantenimiento del equipo.

- **Desarrollo de intervención, conclusiones y reparación:** Detalle de la intervención realizada al equipo, contiene información sobre la mantención realizada y los puntos que pueden quedar pendientes para llevarse a cabo por el turno siguiente.
- **Horómetro.**

4.1.1 Corrección base de datos

Antes de comenzar el análisis, se realiza una limpieza en la base de datos recibida,agregando información respecto a la flota asociada a cada equipo y corrigiendo detalles en relación a códigos dispatch. Lo anterior se realiza con el objetivo de tener mayor claridad y certeza respecto al modo de falla asociado a cada intervención.

Cabe destacar que la base de datos recibida corresponde a archivos excel, donde cada hoja contiene información de un mes en específico, por lo tanto se decide unir toda la información en un único documento, al tener esta "base de datos maestra", con las correcciones antes mencionadas, se comienza el análisis fallas para las flotas, equipos, sistemas y subsistemas en cuestión.

4.1.2 Equipos y Flotas

En la presente memoria se analizaron 6 flotas de perforadoras, entre las cuales hay 2 flotas de contorno (5 equipos) y 4 flotas de producción (10 equipos), los cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Flotas de perforación según tipo y sus respectivos equipos. (fuente: elaboración propia)

Tipo	Flota	Equipos
Producción	Bucyrus 49HR	PO07
		PO12
		PO15
		PO19
	Cat MD6640	PO23
		PO24
		PO25
	Epiroc PV271	PO17
	Epiroc PV351	PO18
		PO26
Contorno	Epiroc DML	PO20
		PO21
		PO22
	Sandvik D75KS	PO13
		PO16

4.2 Análisis de Criticidad

Se comienza el análisis realizando diversos diagramas de Pareto, para tener una visión global de los equipos, y flotas que presentan mayor cantidad de horas de mantenimiento imprevisto. Además del mismo análisis asociado a los sistemas y subsistemas en función de las horas de mantenimiento no programado o imprevisto.

4.2.1 Diagramas de Pareto

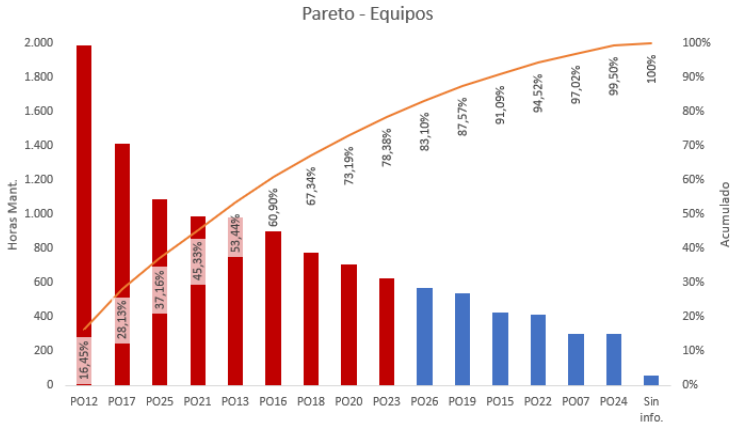

Figura 4.1: Diagrama de Pareto por equipos. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.1 se observan destacados en color rojo los equipos con mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto por equipos.

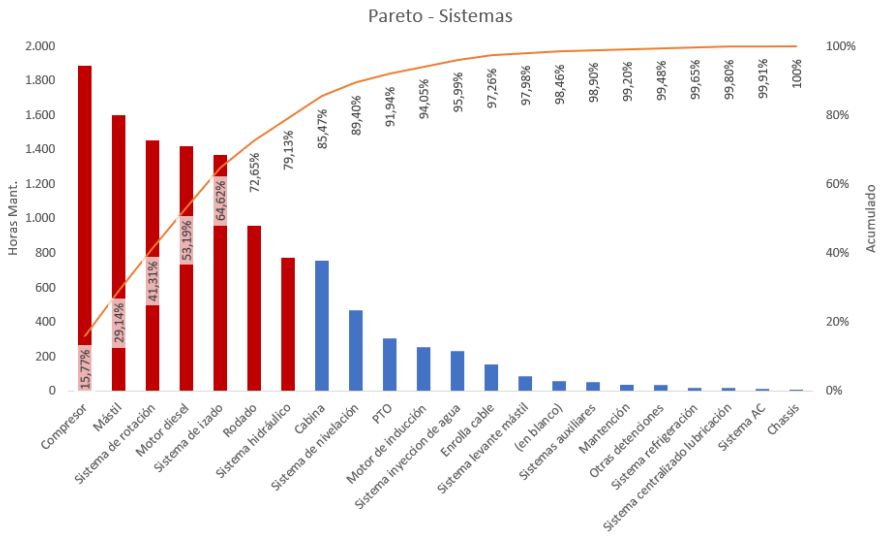

Figura 4.2: Diagrama de Pareto por sistemas. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.2 se observa un diagrama de Pareto, realizado en función de las horas de mantenimiento imprevisto, donde se puede observar que casi el 80% de las horas de mantenimiento imprevisto son dedicadas a sólo 7 sistemas, los cuales son:

- **Compresor:** 1.885,1 horas, correspondientes al 15,77% del total de horas de mantención imprevista.
- **Mástil:** 1.598,73 horas, correspondientes al 13,37% del total de horas de mantención imprevista.
- **Sistema de rotación:** 1.455,62 horas, correspondientes al 12,17% del total de horas de mantención imprevista.
- **Motor diesel:** 1.419,7 horas, correspondientes al 11,87% del total de horas de mantención imprevista.
- **Sistema de izado:** 1.367,05 horas, correspondientes al 11,43% del total de horas de mantención imprevista.
- **Rodado:** 959,45 horas, correspondientes al 8,02% del total de horas de mantención imprevista.

- **Sistema hidráulico:** 775,48 horas, correspondientes al 6,49% del total de horas de mantención imprevista.

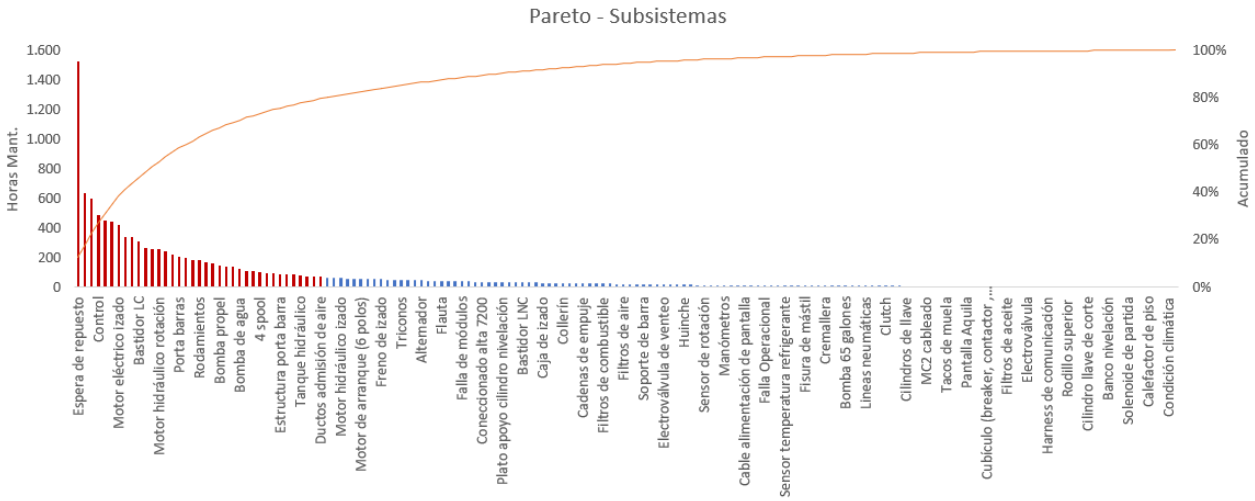

Figura 4.3: Pareto por subsistemas. (fuente: elaboración propia)

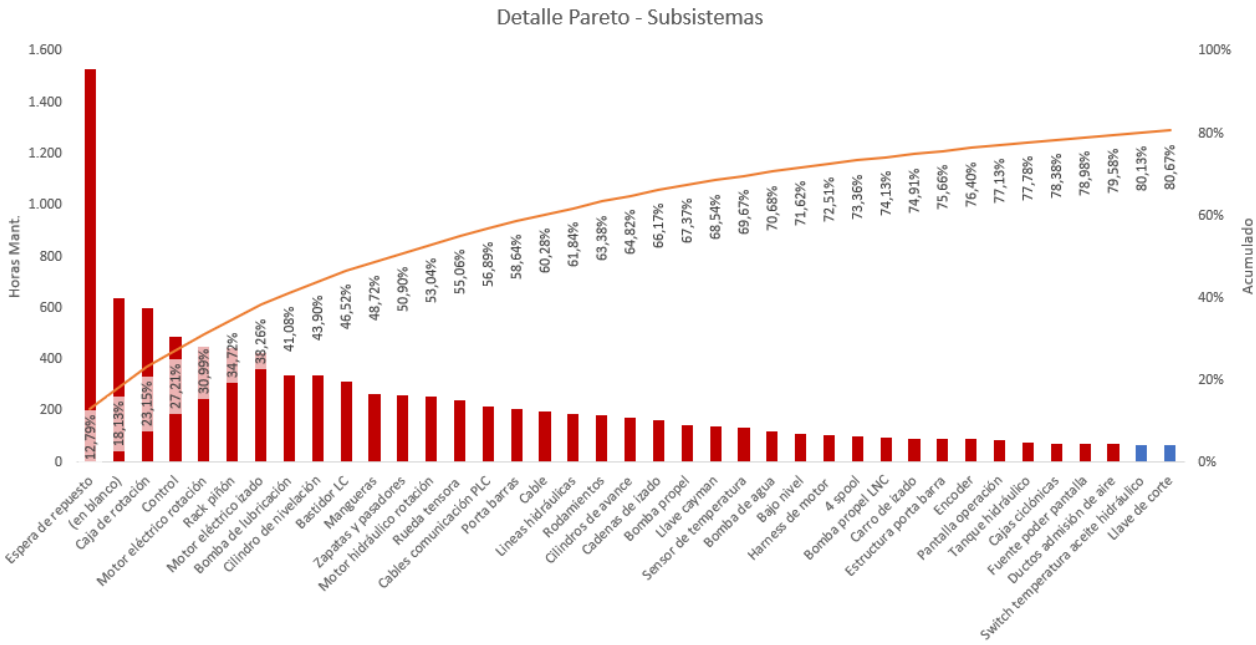

Figura 4.4: Pareto por subsistemas, detalle de sistemas relevantes. (fuente: elaboración propia)

A partir de la figura 4.4 parece importante señalar el predominio de la "espera de repuesto" como causa de una gran cantidad de horas de detención por mantención imprevista, alcanzando el 12,78% del total, lo cual corresponde a 1.528,88 horas.

Por otro lado, y haciendo referencia al mismo diagrama de Pareto, se observa que no se tiene detalle respecto del segundo item de mayor importancia en cuanto a cantidad de horas de mantención imprevista (639,18 horas, correspondientes al 5,35%), lo cual podría explicarse a problemas en el ingreso de datos a la planilla o a inexperiencia del personal, dejando items sin información.

A continuación se procede a analizar los sistemas y subsistemas de los equipos más relevantes, determinados mediante el diagrama de Pareto de la figura 4.1, según el orden de prioridad obtenido.

Equipo PO12

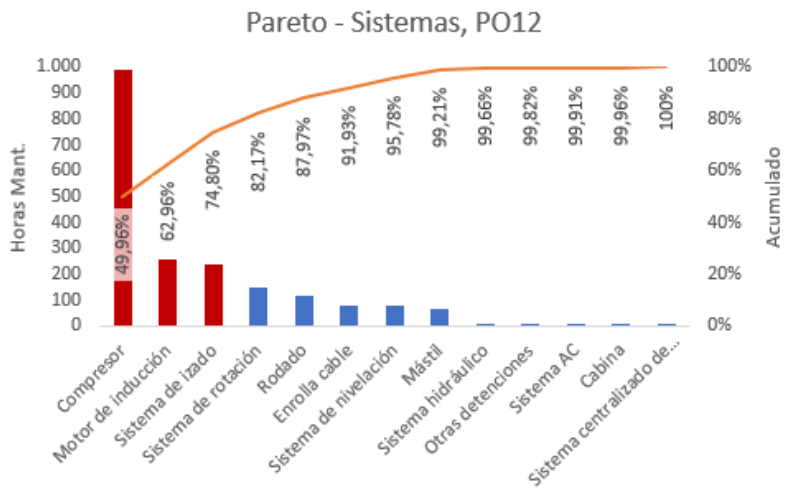

Figura 4.5: Pareto por sistemas, PO12. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.5 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO12, estos son: compresor, motor de inducción y sistema de izado.

Equipo PO17

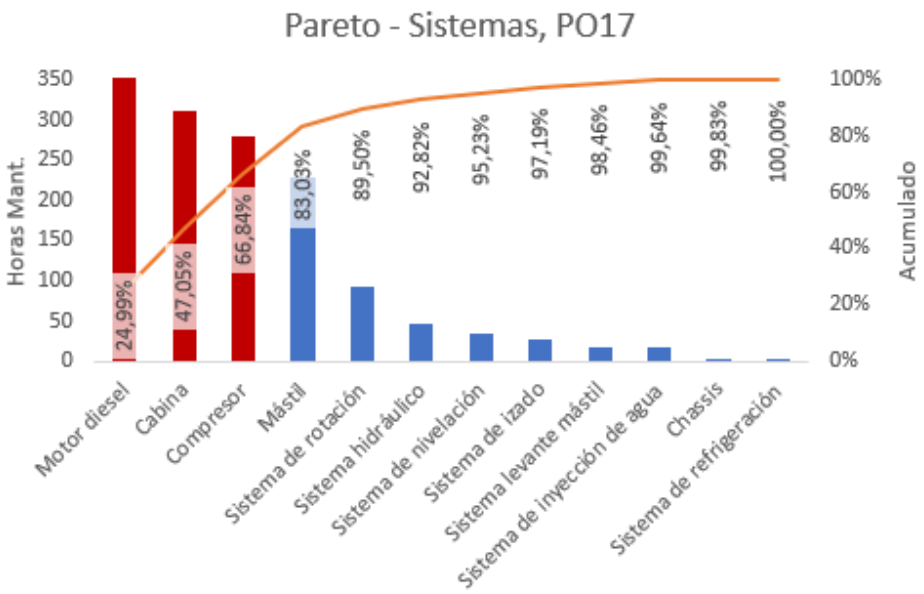

Figura 4.6: Pareto por sistemas, PO17. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.6 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO17, estos son: motor diesel, cabina y compresor.

Equipo PO25

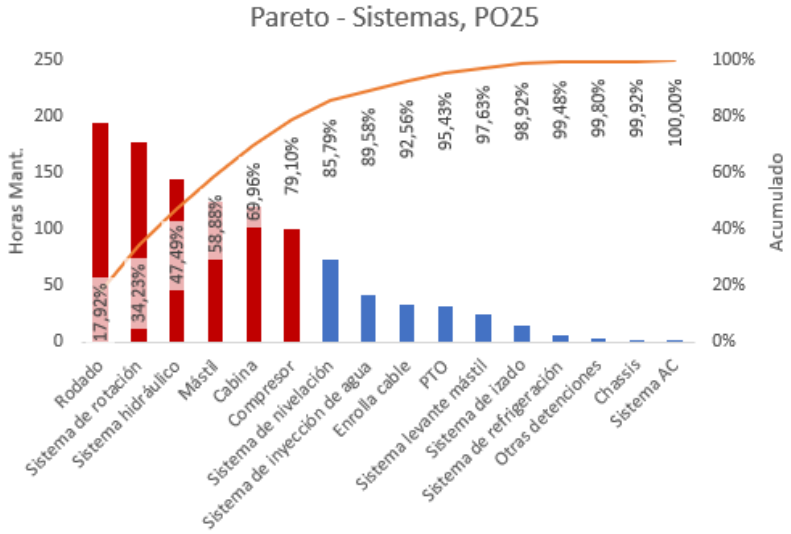

Figura 4.7: Pareto por sistemas, PO25. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.7 se observan 6 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO25, estos son: rodado, sistema de rotación, sistema hidráulico, mástil, cabina y compresor.

Equipo PO21

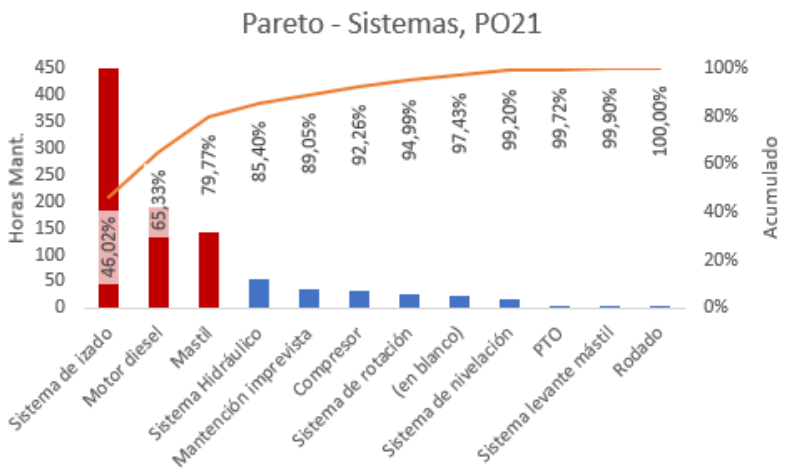

Figura 4.8: Pareto por sistemas, PO21. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.8 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO21, estos son: sistema de izado, motor diesel y mástil.

Equipo PO13

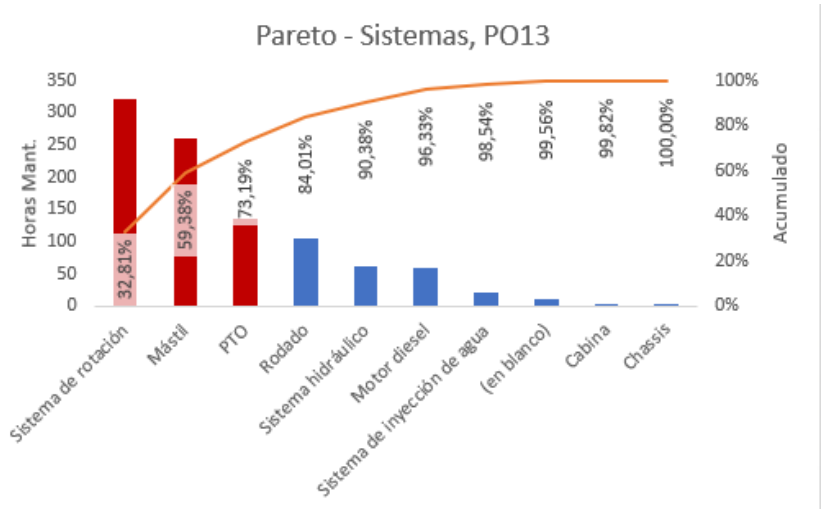

Figura 4.9: Pareto por sistemas, PO13. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.9 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO13, estos son: sistema de rotación, mástil y PTO.

Equipo PO16

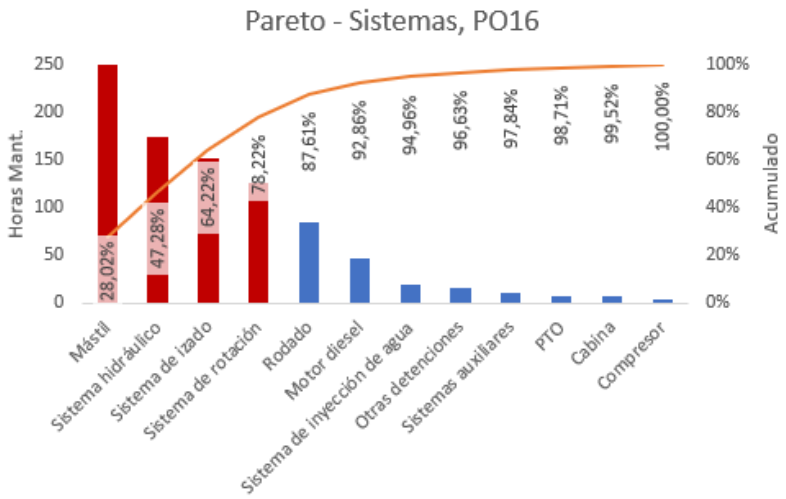

Figura 4.10: Pareto por sistemas, PO16. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.5 se observan 4 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO16, estos son: mástil, sistema hidráulico, sistema de izado y sistema de rotación.

Equipo PO18

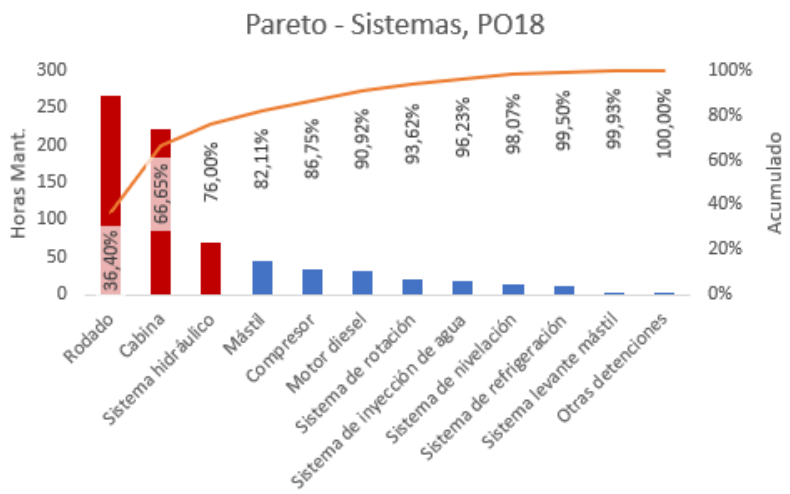

Figura 4.11: Pareto por sistemas, PO18. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.11 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO12, estos son: rodado, cabina y sistema hidráulico.

Equipo PO20

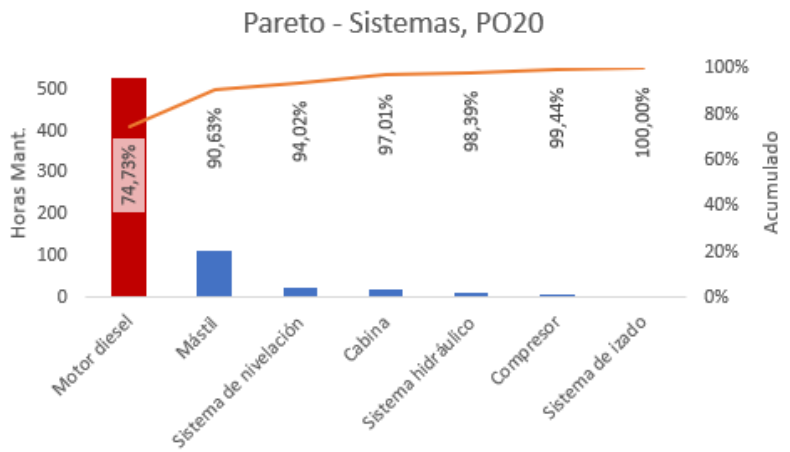

Figura 4.12: Pareto por sistemas, PO20. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.12 se observa 1 sistema de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO20, el motor diesel.

Equipo PO23

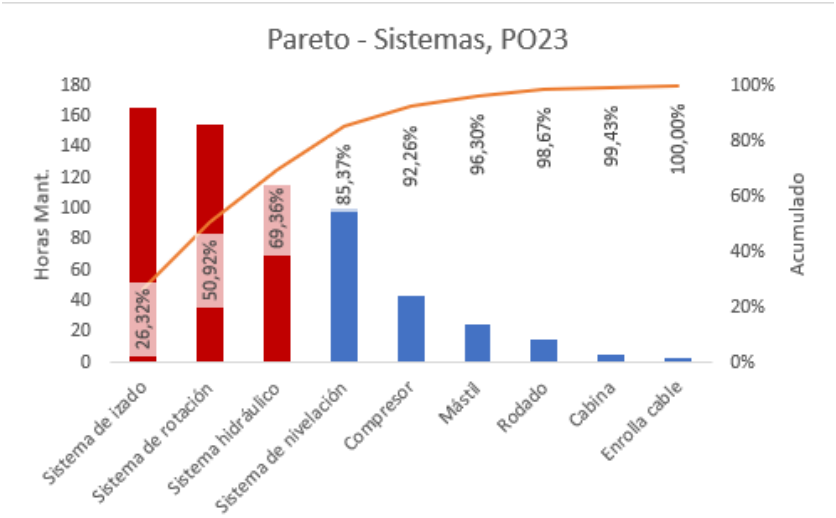

Figura 4.13: Pareto por sistemas, PO23. (fuente: elaboración propia)

En la figura 4.13 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO23, estos son: sistema de izado, sistema de rotación y sistema hidráulico.

4.2.2 Diagramas Jack Knife

A continuación se presentan los diagramas Jack Knife realizado a los equipos relevantes, determinados mediate el análisis de Pareto del punto anterior, con la finalidad de clasificar las fallas según su criticidad.

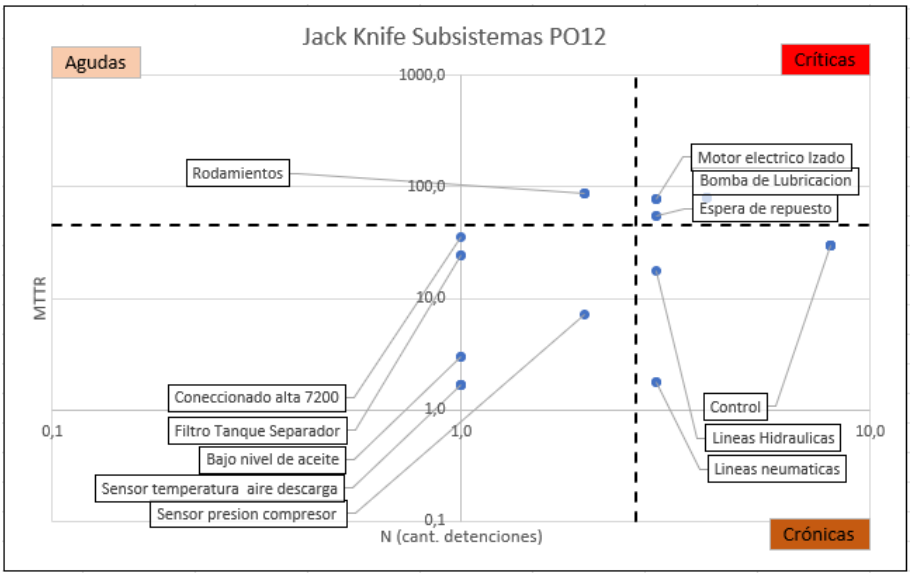

Figura 4.14: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO12. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Motor eléctrico izado, bomba de lubricación, espera de repuesto.

2. **Crónicas:** Control, líneas hidráulicas, líneas neumáticas.

3. **Agudas:** Rodamientos.

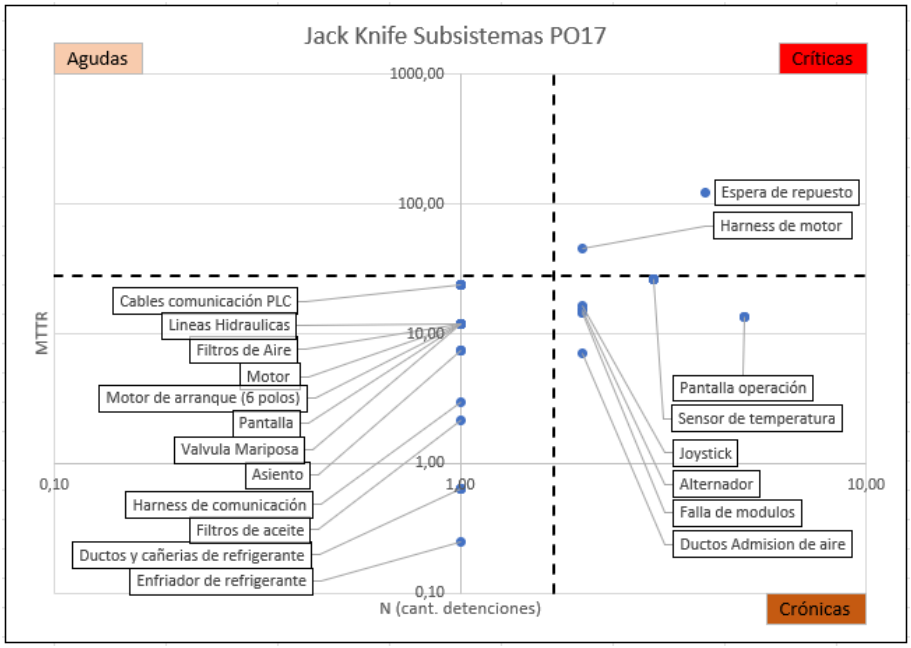

Figura 4.15: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO17. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Espera de repuesto, harness de motor.

2. **Crónicas:** Pantalla operación, sensor de temperatura, joystick, alternador, falla de módulos, ductos de admisión de aire.

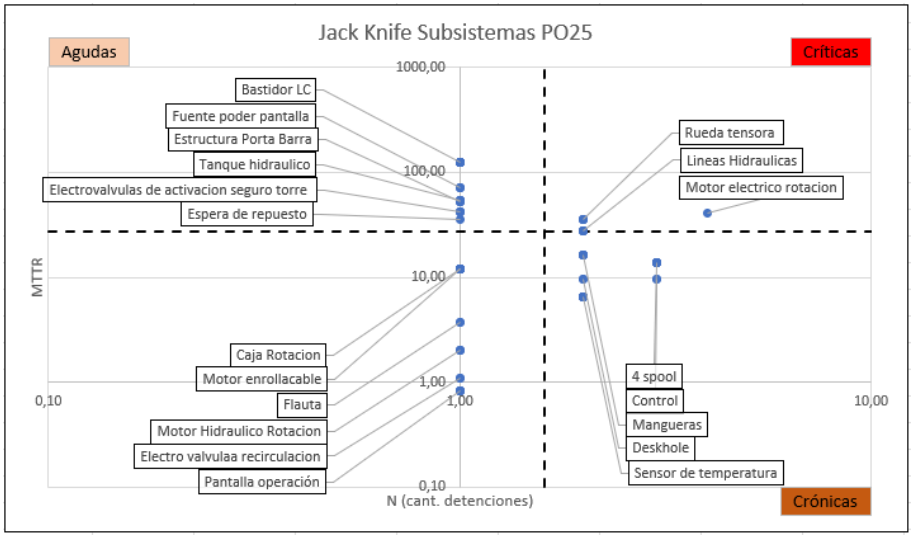

Figura 4.16: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO25. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Rueda tensora, líneas hidráulicas, motor eléctrico de rotación.

2. **Crónicas:** 4 spool, control, mangueras, deskhole, sensor de temperatura.

3. **Agudas:** Bastidos LC, fuente de poder pantalla, estructura porta barra, tanque hidráulico, electroválvulas de activación seguro torre, espera de repuesto.

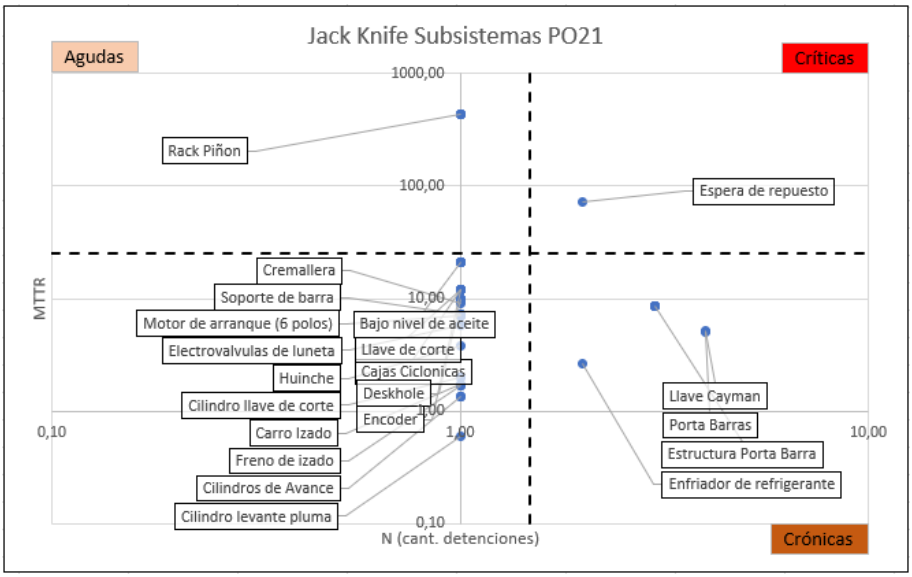

Figura 4.17: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO21. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Espera de repuesto.

2. **Crónicas:** Llave caymán, porta barra, estructura porta barra, enfriador de refrigerante.

3. **Agudas:** Rack piñón.

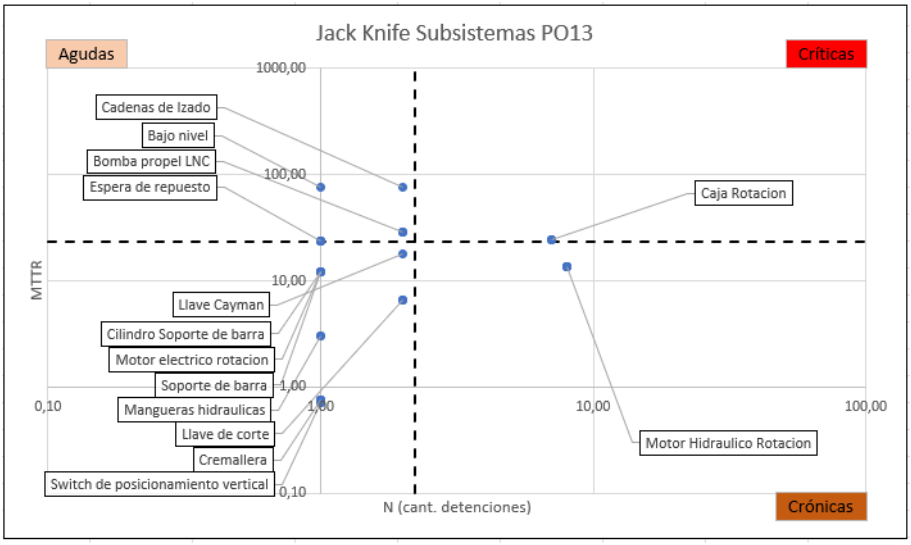

Figura 4.18: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO13. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Caja de rotación.

2. **Crónicas:** Motor hidráulico de rotación.

3. **Agudas:** Cadenas de izado, bajo nivel, bomba propel LNC, espera de repuesto.

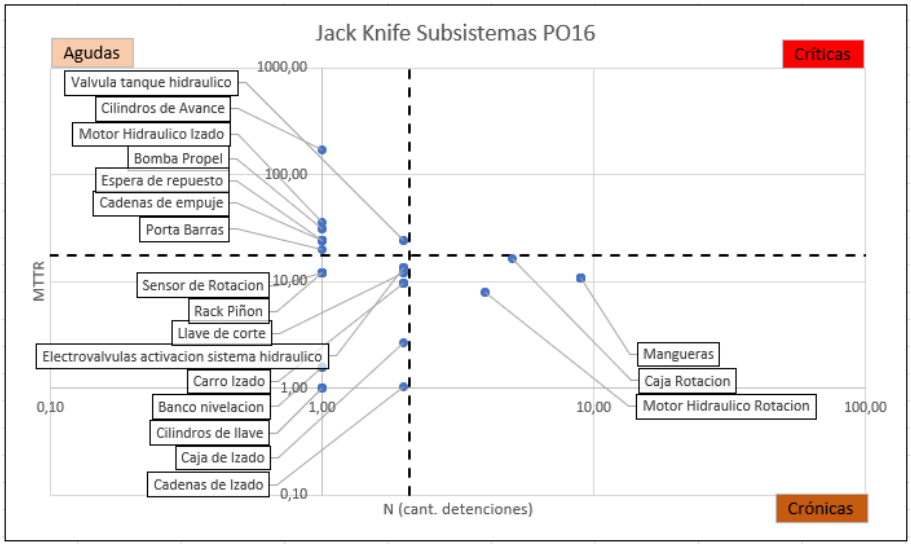

Figura 4.19: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO16. (fuente: elaboración propia)

1. **Crónicas:** Mangueras, caja de rotación, motor hidráulico de rotación.

2. **Agudas:** Válvula tanque hidráulico, cilindros de avance, motor hidráulico izado, bomba propel, espera de repuesto, cadenas de empuje, porta barras.

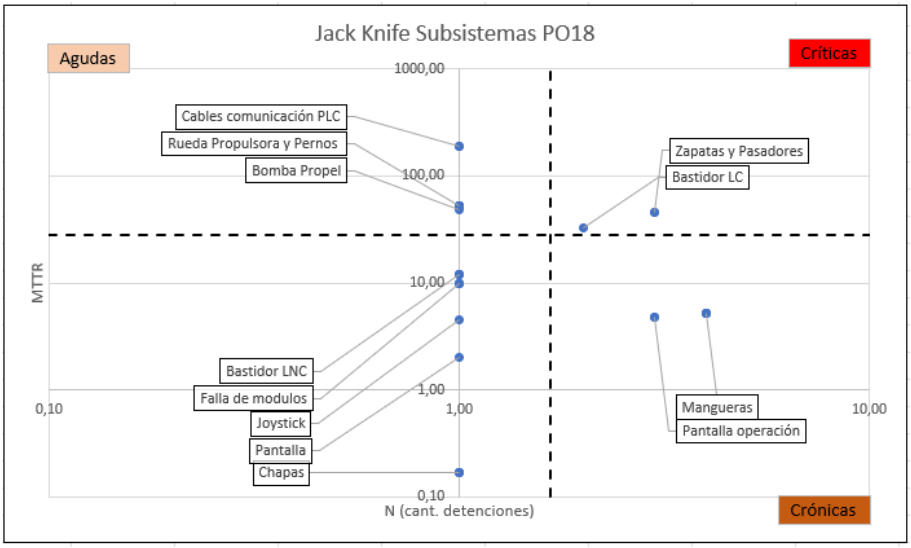

Figura 4.20: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO18. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Zapatas y pasadores, bastidor LC.

2. **Crónicas:** Mangueras, pantalla de operación.

3. **Agudas:** Cables de comunicación PLC, rueda propulsora y pernos, bomba propel.

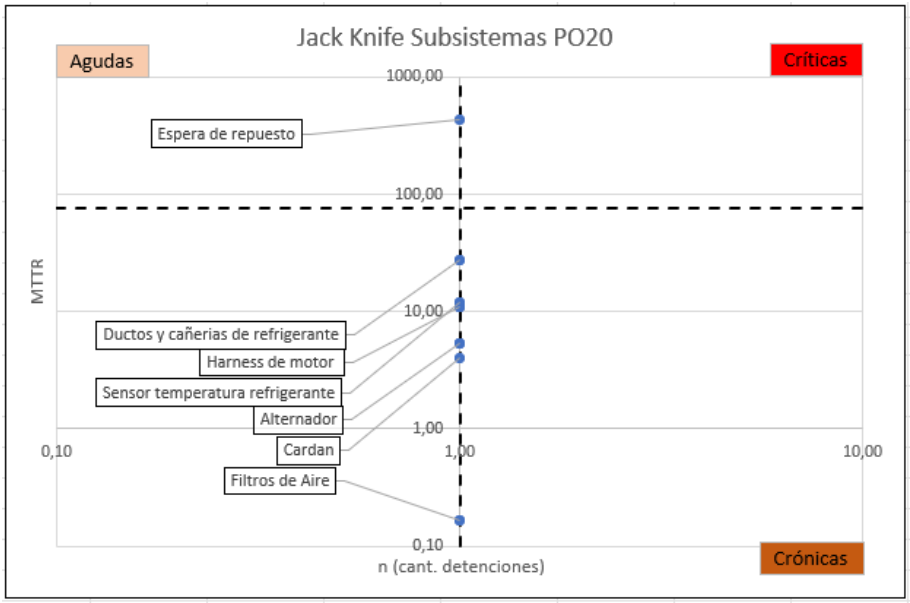

Figura 4.21: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO20. (fuente: elaboración propia)

1. **Agudas:** Espera de repuesto.

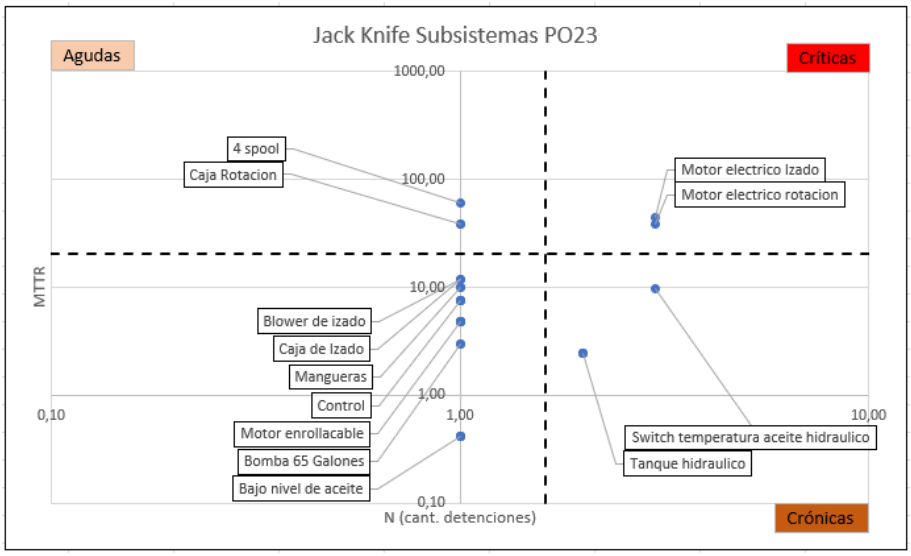

Figura 4.22: Diagrama Jack Knife por subsistemas, asociado a sistemas relevantes de PO23. (fuente: elaboración propia)

1. **Críticas:** Motor eléctrico de izado, motor eléctrico de rotación.

2. **Crónicas:** Switch de temperatura aceite hidráulico, tanque hidráulico.

3. **Agudas:** 4 spool, caja de rotación.

4.3 Modelos de Confiabilidad

En esta sección se realizará una proyección de tiempo estimado para cambio de componentes de acuerdo a un modelo de Weibull, con la finalidad de determinar la vida de dichos componentes. Para lo anterior se utilizará como referencia una base de datos histórica, la cual contiene información respecto de las horas a las cuales se han realizado dichos cambios anteriormente (ejemplo base de datos en figura 4.2), todo esto con el objetivo de encontrar oportunidades de mejoras al plan actual de mantenimiento.

Se procede a realizar análisis de weibull a componentes mayores (motor, compresor, PTO y cabezal de rotación). Para esto se utiliza la base de datos con información de fechas y horómetros al cual se han cambiado dichos componentes.

Tabla 4.2: Ejemplo data cambio de componente, motor eléctrico PO01 - PO07. (fuente: Base de datos CMDIC)

EQUIPO	COMPONENTE	FECHA DE INSTALACIÓN	HORÓMETRO INSTALACIÓN	FECHA DE RETIRO	HORÓMETRO RETIRO	HORAS DEL COMPONENTE	VIDA ÚTIL
PO01	MOTOR ELECTRICO	02-06-2002	32.629,30	29-06-2009	76.920,30	44.291	30.000
PO01	MOTOR ELECTRICO	29-06-2009	76.920,30	26-05-2021	116.438,03	39.518	30.000
PO07	MOTOR ELECTRICO	15-04-2008	209,60	06-07-2015	36.171,58	35.962	15.000
PO07	MOTOR ELECTRICO	06-07-2015	36.171,58	02-01-2016	37.924,45	1.753	15.000
PO07	MOTOR ELECTRICO	02-01-2016	37.924,45	19-11-2017	43.935,89	6.011	15.000
PO07	MOTOR ELECTRICO	19-11-2017	43.935,89	15-06-2020	53.165,27	9.229	15.000
PO07	MOTOR ELECTRICO	15-06-2020	53.165,27	26-05-2021	55.063,69	1.898	15.000

Para cada componente se analizaron diversos casos, censurando gradualmente los datos en análisis para eliminar sesgos y hallar el caso que represente de mejor manera el comportamiento del componente en análisis de acuerdo al contexto operativo real de cada equipo. A continuación se presentará el caso más representativo por componente.

En el "anexo A" se puede hallar el análisis de Weibull total, con todos los casos de estudio.

4.3.1 Bucyrus 49HR

En esta flota se analizó por separado el equipo PO07 de los otros, debido a que posee componentes de la flota 49RIII (flota antigua, fuera de análisis en la presente memoria). A continuación se presentan las tablas de datos y gráficos más representativos para cada componente.

Motor Eléctrico PO01-PO07 (total de datos)

Tabla 4.3: Fallas en motor eléctrico PO01 - PO07. (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.753	0,094594595	7,469009724	-2,308880127
2	1.898	0,22972973	7,54877724	-1,343181902
3	6.011	0,364864865	8,701419599	-0,789839834
4	9.229	0,5	9,130147153	-0,366512921
5	35.962	0,635135135	10,49021746	0,00819456
6	39.518	0,77027027	10,58450456	0,385841654
7	44.291	0,905405405	10,6985368	0,85787951

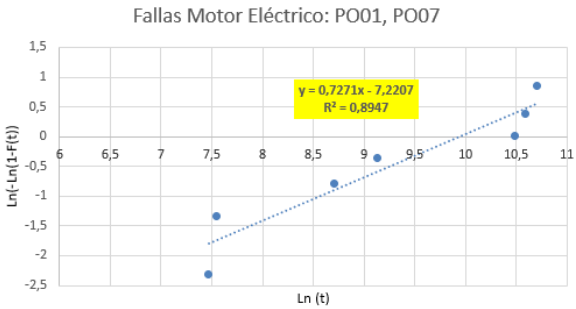

Figura 4.23: Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia)

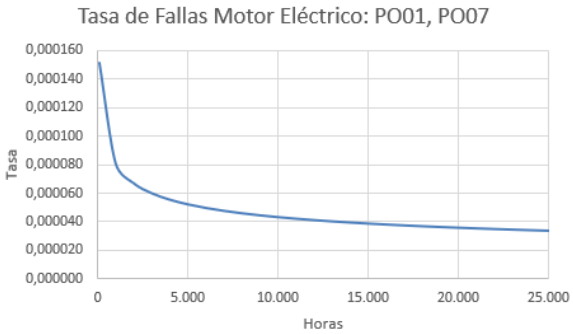

Figura 4.24: Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia)

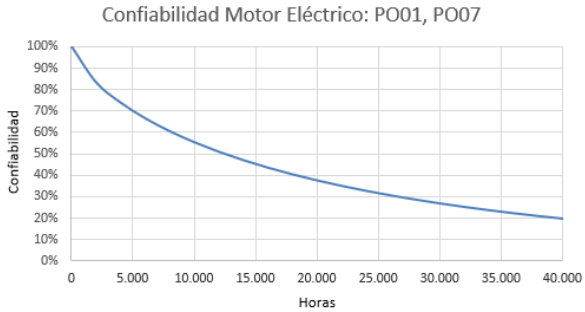

Figura 4.25: Curva de confiabilidad motor eléctrico PO01-PO07. (fuente elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.1, 6.2, 6.3) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico del equipo PO07, el cual se realizó incluyendo datos del equipo PO01, ya que ambos poseen el mismo modelo de motor eléctrico. Esta decisión se tomó en pos de aumentar la base de datos para establecer de mejor manera el comportamiento de dicho componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 25.128 horas.

Motor Eléctrico PO12, PO15, PO19 (+/- 70% vida útil)

Tabla 4.4: Data regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5.271	0,094594595	8,569920357	-2,3088801
2	6.515	0,22972973	8,781851745	-1,3431819
3	8.678	0,364864865	9,06856712	-0,7898398
4	10.424	0,5	9,25186516	-0,3665129
5	15.966	0,635135135	9,678223421	0,00819456
6	20.671	0,77027027	9,93649211	0,38584165
7	22.804,49	0,905405405	10,03471273	0,85787951

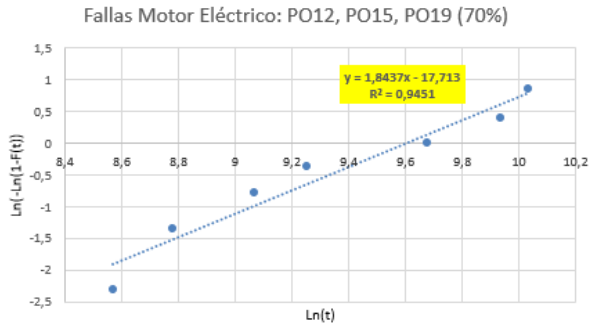

Figura 4.27: Fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19, regresión lineal (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

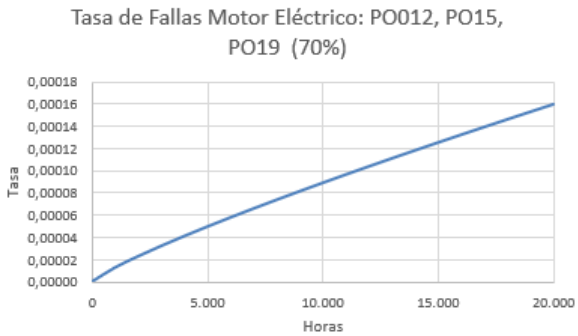

Figura 4.26: Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

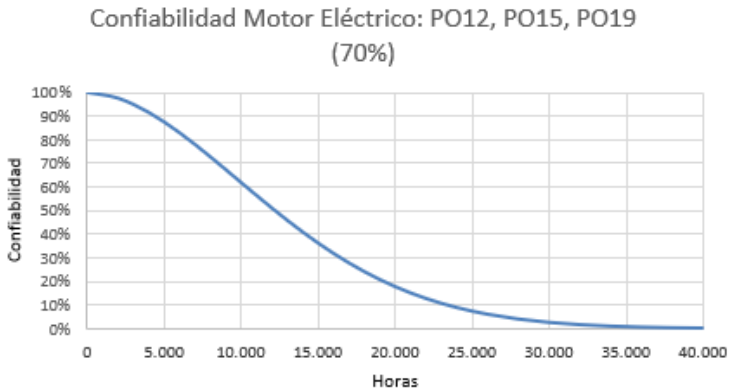

Figura 4.28: Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.13, 6.14, 6.15) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 13.212 horas.

Compresor PO01, PO07 (+/- 30% vida útil)

Tabla 4.5: Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	14.676,77	0,159090909	9,594021523	-1,752894273
2	20.532,85	0,386363636	9,929781323	-0,716717249
3	29.459,35	0,613636364	10,29076652	-0,050266149
4	32.039,39	0,840909091	10,37472139	0,608830072

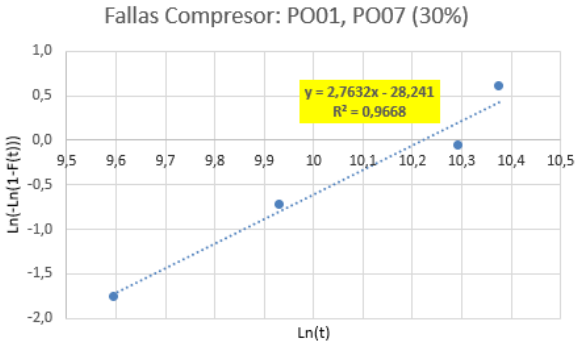

Figura 4.30: Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

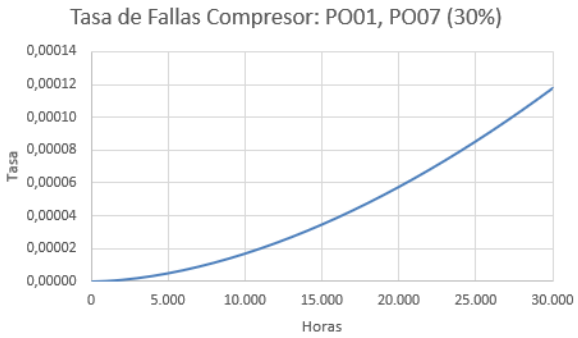

Figura 4.29: Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

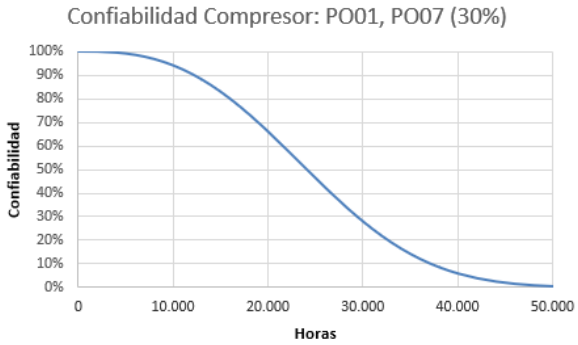

Figura 4.31: Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.31, 6.32, 6.33) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO01 y PO07, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 24.438 horas.

Compresor PO12-PO15-PO19 (total de datos)

Tabla 4.6: Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	4.976,66	0,083333333	8,512514262	-2,4417
2	8.842,90	0,202380952	9,087370168	-1,4867
3	14.262,80	0,321428571	9,565410028	-0,9474
4	14.345,72	0,44047619	9,571206919	-0,5436
5	19.530,48	0,55952381	9,879731601	-0,1986
6	23.483,10	0,678571429	10,06403651	0,1266
7	35.463,83	0,797619048	10,47626849	0,4685
8	43.601,29	0,916666667	10,68284194	0,9102

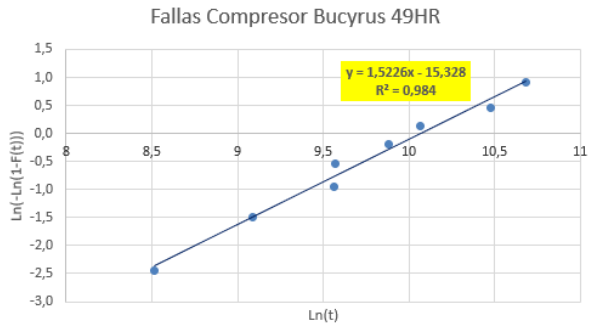

Figura 4.33: Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

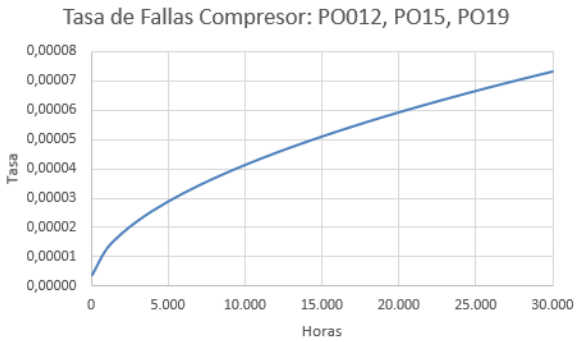

Figura 4.32: Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

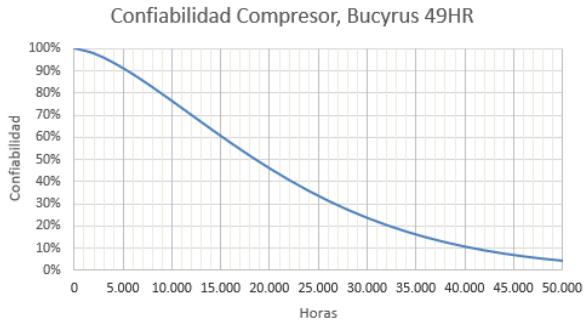

Figura 4.34: Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.34, 6.35, 6.36) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO12, PO15 y PO19.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 21.225 horas.

PTO PO07 (total de datos)

Tabla 4.7: Fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	13.686	0,291666667	9,524092888	-1,064673327
2	41.169	0,708333333	10,62543055	0,208755483

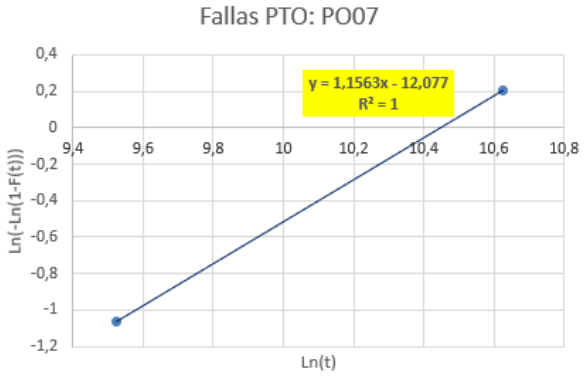

Figura 4.36: Regresión lineal, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

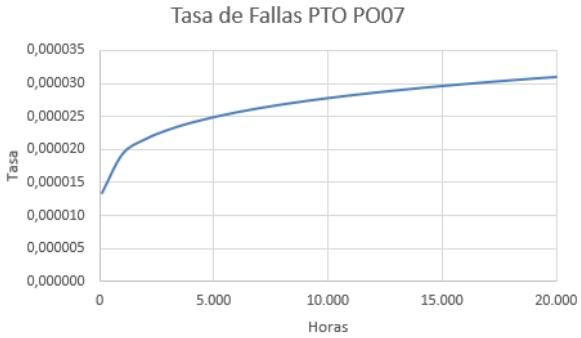

Figura 4.35: Tasa de fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

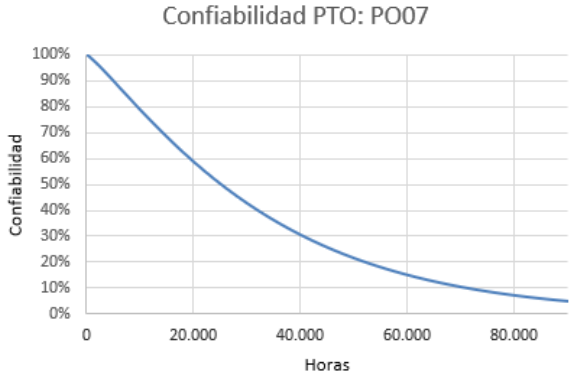

Figura 4.37: Curva de confiabilidad, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.46, 6.47, 6.48) se presenta el análisis realizado para el PTO del equipo PO07.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 32.645 horas.

PTO P012-PO15-PO19 (+/- 70% vida útil)

Tabla 4.8: Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	4.919,18	0,083333333	8,500897129	-2,441716399
2	6.375,08	0,202380952	8,760151919	-1,486670964
3	9.134,61	0,321428571	9,11982541	-0,947354424
4	9.329,70	0,44047619	9,140958139	-0,543574052
5	11.273	0,55952381	9,330208344	-0,198574256
6	12.590,57	0,678571429	9,440703003	0,12661497
7	13.996	0,797619048	9,546527568	0,468504666
8	16.119,67	0,916666667	9,687795544	0,910235093

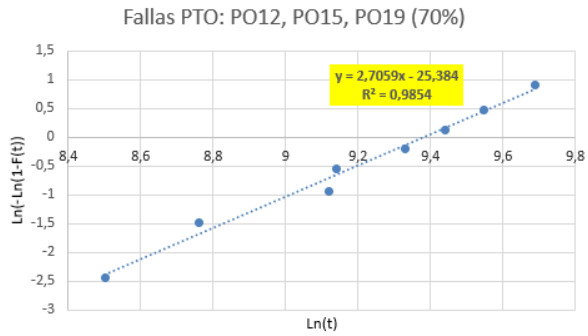

Figura 4.39: Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

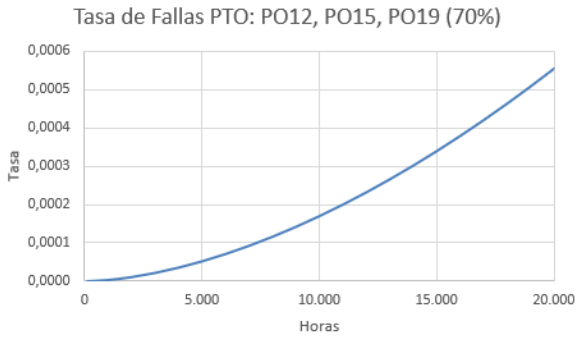

Figura 4.38: Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

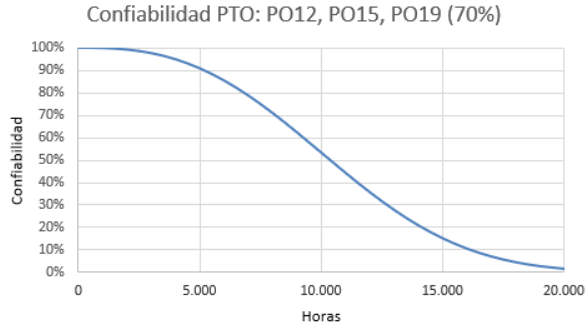

Figura 4.40: Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.52, 6.53, 6.54) se presenta el análisis realizado para el PTO de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.548 horas.

4.3.2 Epiroc DML

Motor Diesel Epiroc DML (+/- 30% vida útil)

Tabla 4.9: Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.881,79	0,159090909	9,091758392	-1,752894273
2	9.845,24	0,386363636	9,19474303	-0,716717249
3	12.072,08	0,613636364	9,398650627	-0,050266149
4	14.509,25	0,840909091	9,582541886	0,608830072

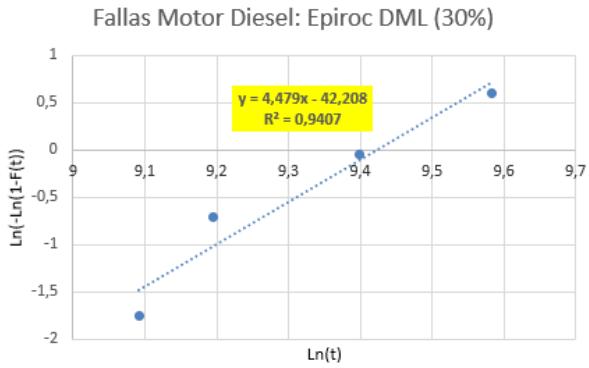

Figura 4.42: Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

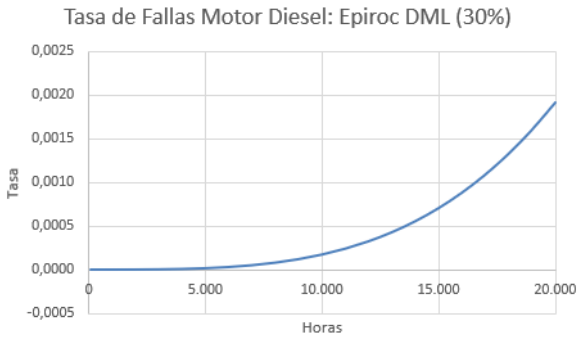

Figura 4.41: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

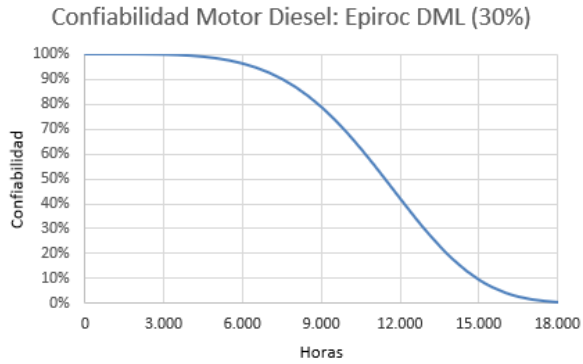

Figura 4.43: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.67, 6.68, 6.69) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc DML, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.291 horas.

4.3.3 Cat MD6640

Compresor Cat MD6640 (total de datos)

Tabla 4.10: Fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	15.930,61	0,205882353	9,675997695	-1,467401781
2	16.084,74	0,5	9,685626338	-0,366512921
3	16.828,48	0,794117647	9,730827968	0,457709854

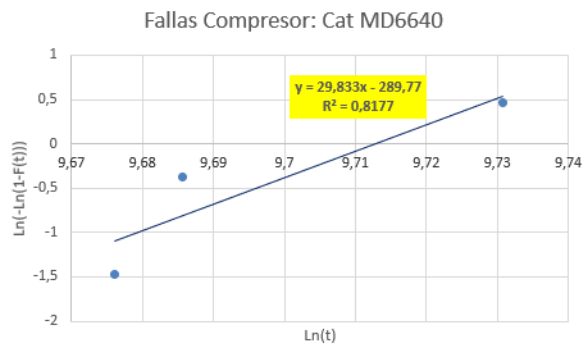

Figura 4.45: Regresión lineal, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

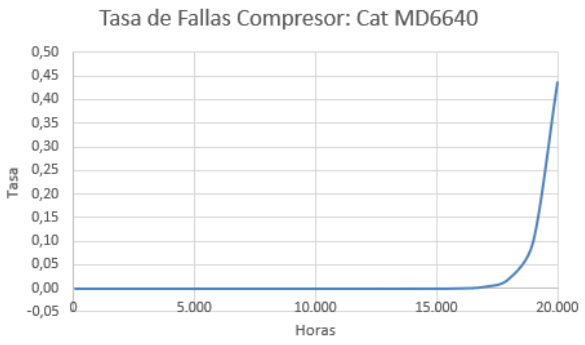

Figura 4.44: Tasa de fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

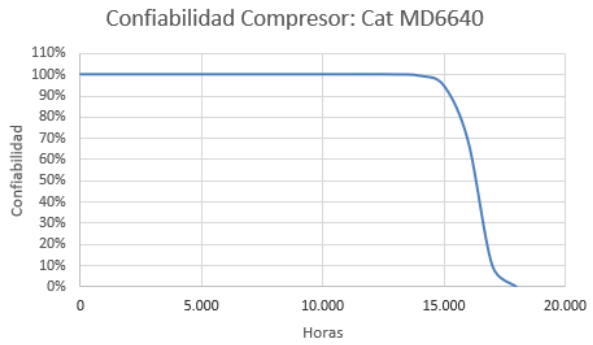

Figura 4.46: Curva de confiabilidad, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.70, 6.71, 6.72) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Cat MD6640.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 16.230 horas.

PTO Cat MD6640 (total de datos)

Tabla 4.11: Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	2.848,41	0,109375	7,954516223	-2,155616006
2	5.695,29	0,265625	8,647394796	-1,175270415
3	7.386,91	0,421875	8,907464794	-0,601543551
4	7.639,77	0,578125	8,941122777	-0,147287035
5	8.444,97	0,734375	9,041326395	0,281917795
6	16.828,48	0,890625	9,730827968	0,794336831

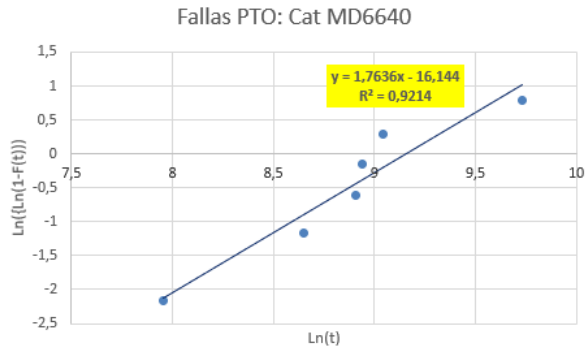

Figura 4.48: Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

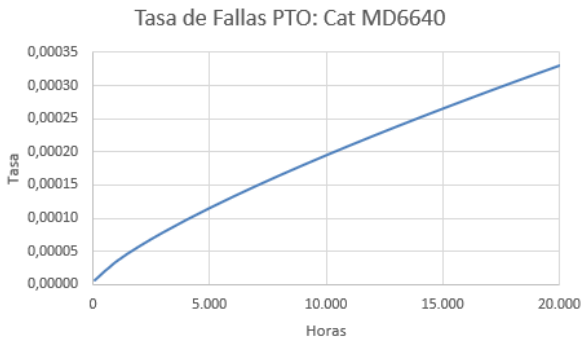

Figura 4.47: Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

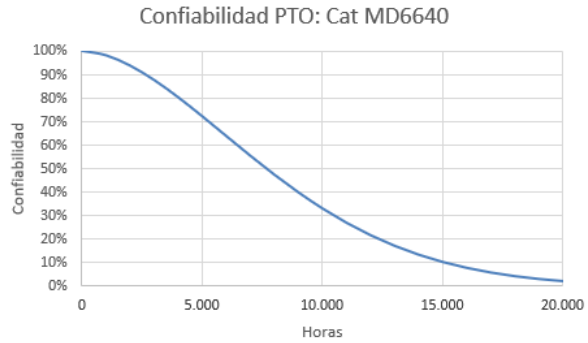

Figura 4.49: Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.73, 6.74, 6.75) se presenta el análisis realizado para el PTO de la flota Cat MD6640.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 8.415 horas.

4.3.4 Sandvik D75KS

Cabezal de Rotación Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 4.12: Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	7.718,32	0,109375	8,951351951	-2,155616006
2	8.586,14	0,265625	9,057904554	-1,175270415
3	8633,31	0,421875	9,063383256	-0,601543551
4	10.163,75	0,578125	9,226582748	-0,147287035
5	11.610,57	0,734375	9,359671485	0,281917795
6	13.956,84	0,890625	9,54372499	0,794336831

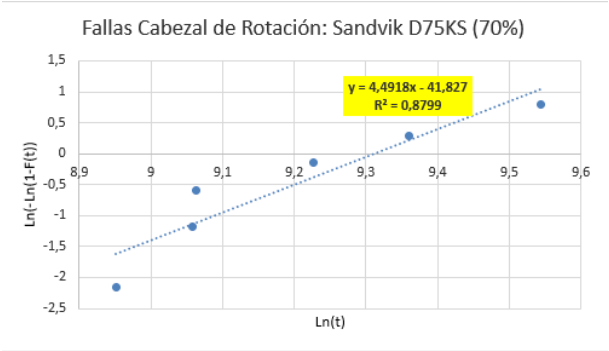

Figura 4.51: Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

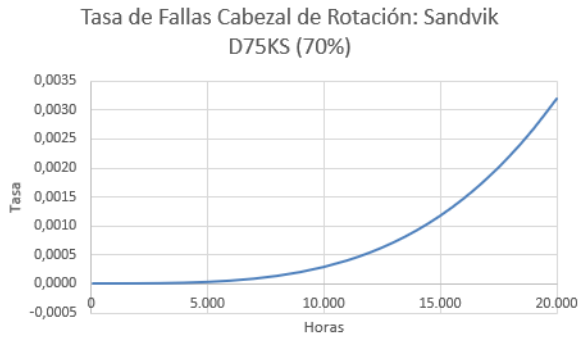

Figura 4.50: Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

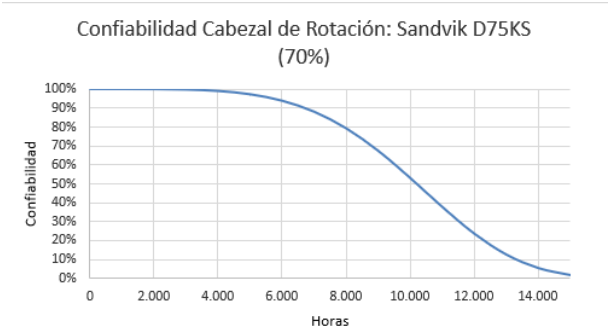

Figura 4.52: Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.85, 6.86, 6.87) se presenta el análisis realizado para el cabezal de rotación de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.100 horas.

Compresor Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 4.13: Fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.633,31	0,205882353	9,063383256	-1,467401781
2	27.915,03	0,5	10,23692065	-0,366512921
3	46.499,75	0,794117647	10,74720214	0,457709854

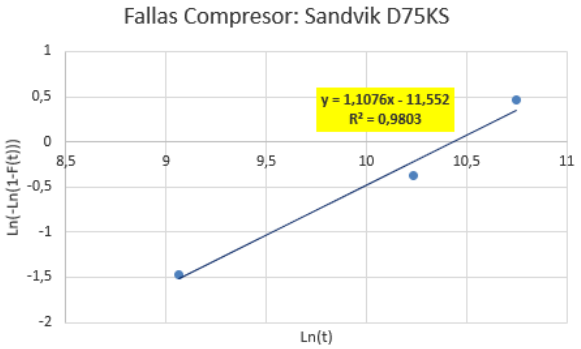

Figura 4.54: Regresión lineal, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

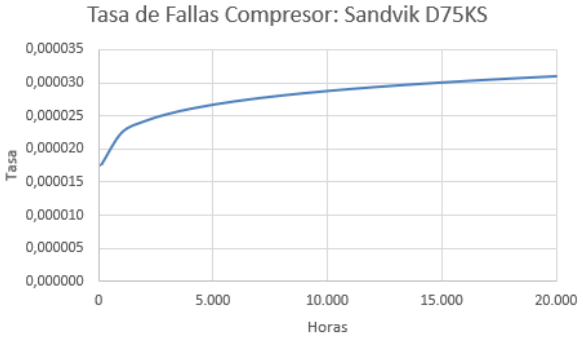

Figura 4.53: Tasa de fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

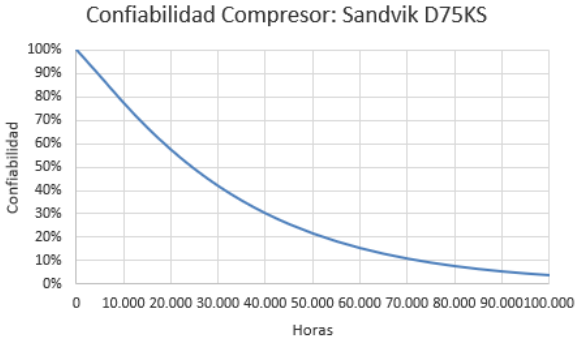

Figura 4.55: Curva de confiabilidad, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.91, 6.92, 6.93) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 32.591 horas.

Motor Diesel Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 4.14: Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	3.510,97	0,094594595	8,163647632	-2,308880127
2	7.352,84	0,22972973	8,902841912	-1,343181902
3	8.633,31	0,364864865	9,063383256	-0,789839834
4	9.439,86	0,5	9,152696429	-0,366512921
5	12.494,56	0,635135135	9,433048597	0,00819456
6	15.420,47	0,77027027	9,643451364	0,385841654
7	26.196,08	0,905405405	10,17336494	0,85787951

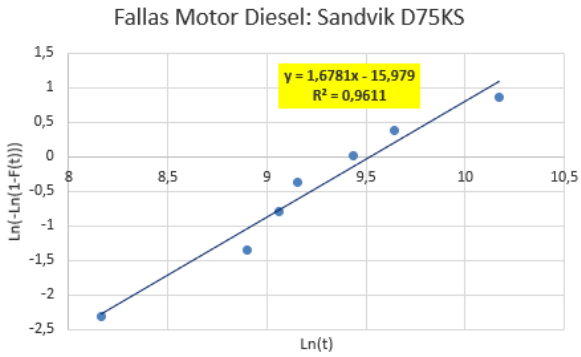

Figura 4.57: Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

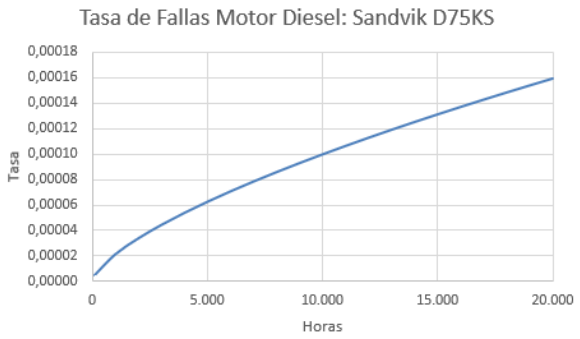

Figura 4.56: Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

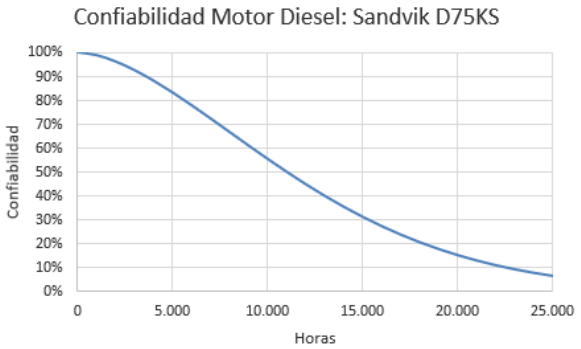

Figura 4.58: Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.97, 6.98, 6.99) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 12.197 horas.

PTO 3 Holes Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 4.15: Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5.016,27	0,12962963	8,520441909	-1,974458694
2	5.581,90	0,314814815	8,627284499	-0,972686141
3	5.981,45	0,5	8,696418292	-0,366512921
4	8.658,95	0,685185185	9,066348747	0,144767396
5	12.352,29	0,87037037	9,421596718	0,714455486

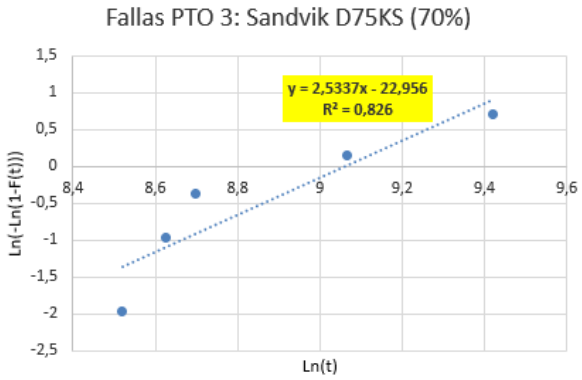

Figura 4.60: Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

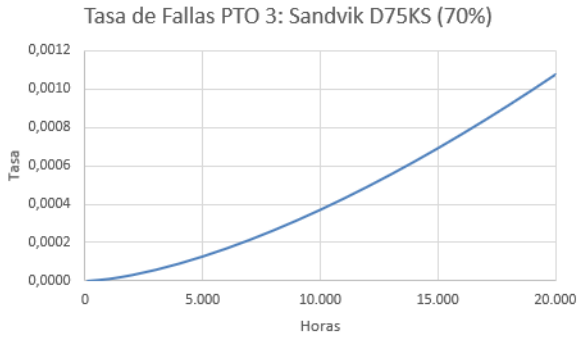

Figura 4.59: Tasa de fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

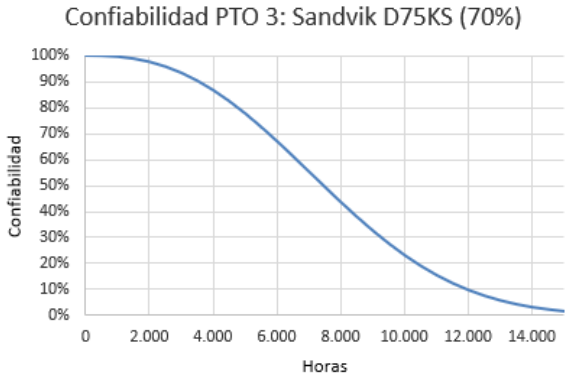

Figura 4.61: Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.109, 6.110, 6.111) se presenta el análisis realizado para el PTO 3 holes de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 7.639 horas.

PTO 4 Holes Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 4.16: Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	2.142,27	0,094594595	7,669621293	-2,308880127
2	2.889,01	0,22972973	7,968669162	-1,343181902
3	3.432,38	0,364864865	8,141009177	-0,789839834
4	5.744,30	0,5	8,655963338	-0,366512921
5	12.352,29	0,635135135	9,421596718	0,00819456
6	13.420,47	0,77027027	9,504536705	0,385841654
7	23.823,67	0,905405405	10,0784349	0,85787951

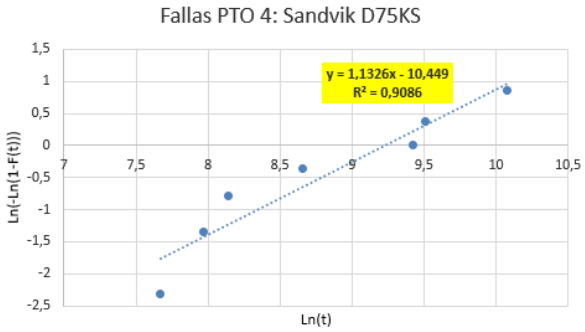

Figura 4.63: Regresión lineal, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

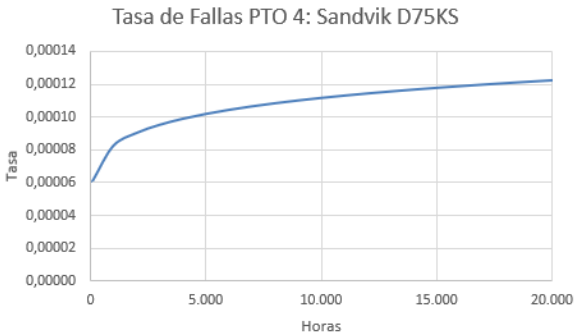

Figura 4.62: Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

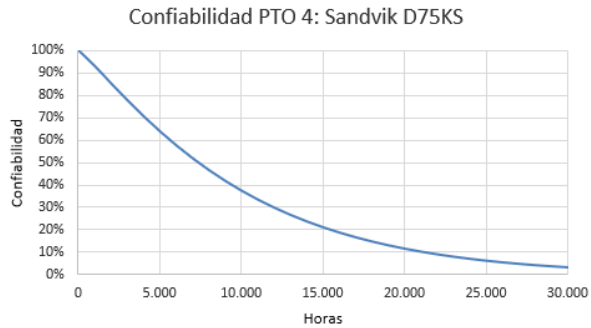

Figura 4.64: Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.115, 6.116, 6.117) se presenta el análisis realizado para el PTO 4 holes de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 9.708 horas.

4.3.5 Epiroc PV271

Motor Diesel Epiroc PV271 (total de datos)

Tabla 4.17: Fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.263,65	0,2059	7,141759638	-1,467401781
2	4.792,20	0,5	8,474744875	-0,366512921
3	19.570,70	0,7941	9,881788829	0,457709854

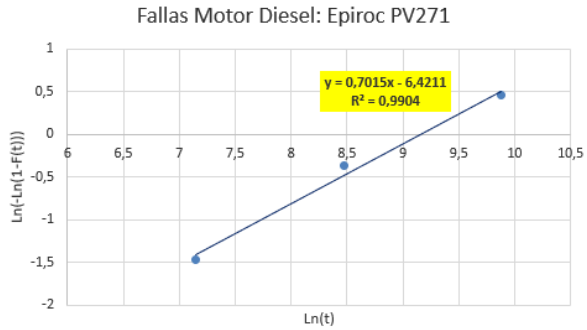

Figura 4.66: Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

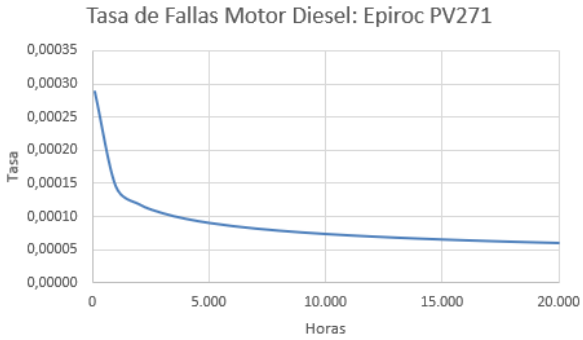

Figura 4.65: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

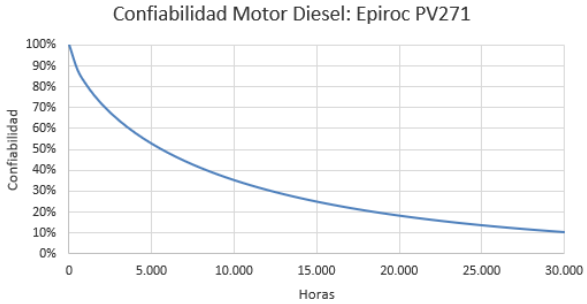

Figura 4.67: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.124, 6.125, 6.126) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc PV271.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.933 horas.

Compresor Epiroc PV271 (total de datos)

Tabla 4.18: Fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.263,65	0,2917	7,141759638	-1,064673327
2	34.295,00	0,7083	10,44275485	0,208755483

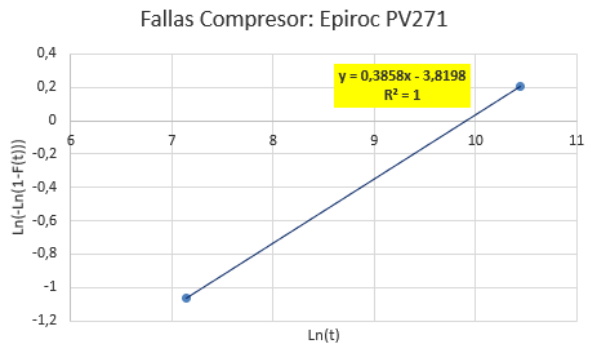

Figura 4.69: Regresión lineal, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

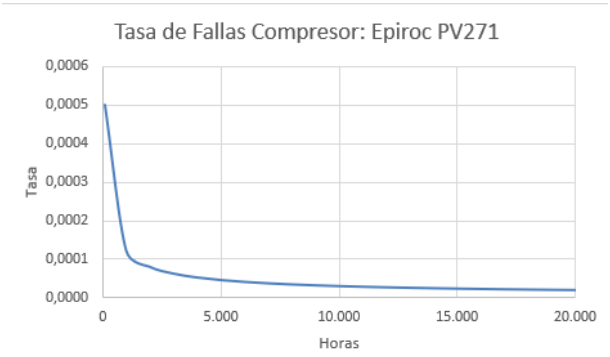

Figura 4.68: Tasa de fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

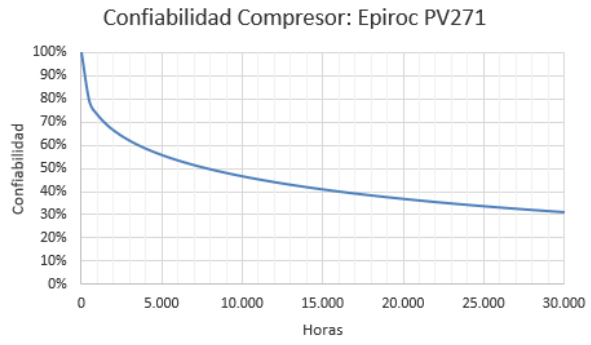

Figura 4.70: Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.130, 6.131, 6.132) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Epiroc PV271.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 73.486 horas.

4.3.6 Epiroc PV351

Motor Diesel Epiroc PV351 (total de datos)

Tabla 4.19: Fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	3.850,45	0,205882353	8,255945304	-1,467401781
2	15.658,53	0,5	9,658771095	-0,366512921
3	20.792,77	0,794117647	9,942360373	0,457709854

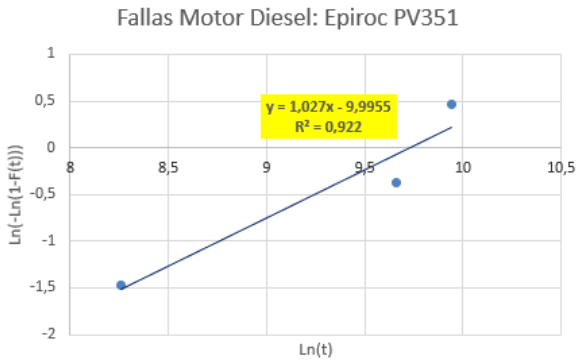

Figura 4.72: Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

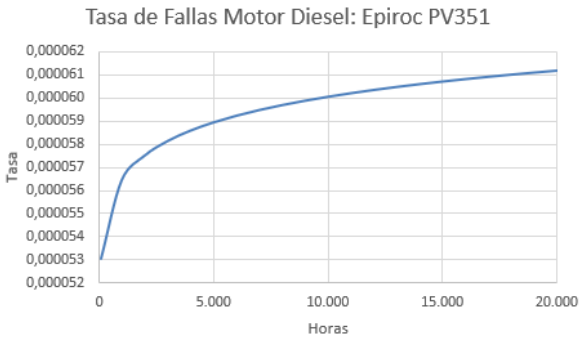

Figura 4.71: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

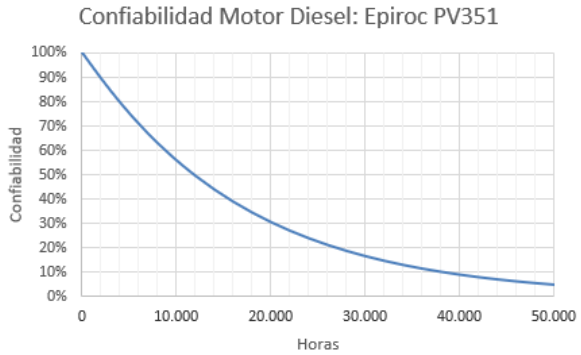

Figura 4.73: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.133, 6.134, 6.135) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc PV351.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 16.678 horas.

Compresor Epiroc PV351 (total de datos)

Tabla 4.20: Fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	6.931,42	0,291666667	8,843819977	-1,064673327
2	32.914,46	0,708333333	10,40166721	0,208755483

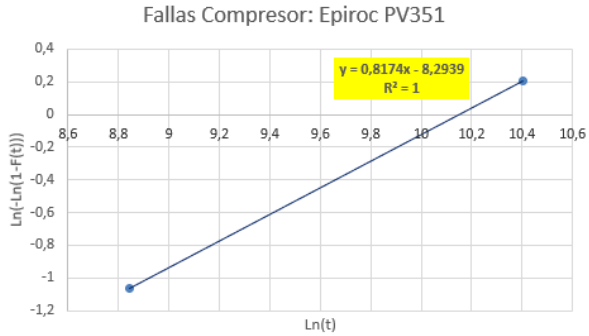

Figura 4.75: Regresión lineal, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

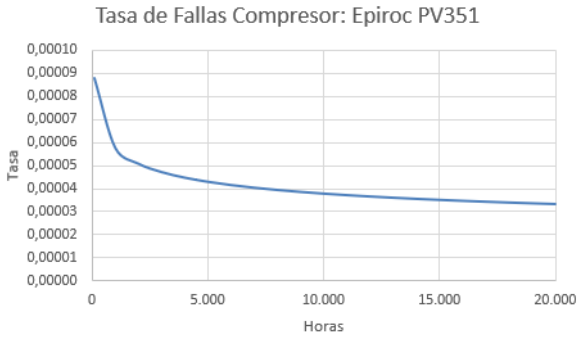

Figura 4.74: Tasa de fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

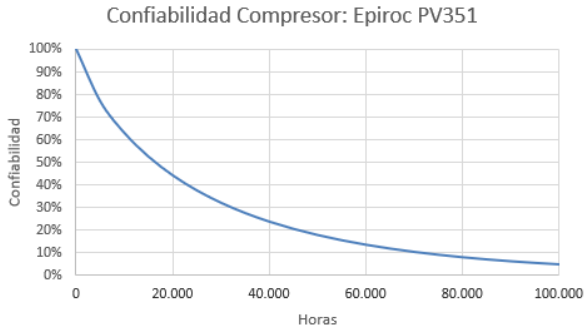

Figura 4.76: Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.139, 6.140, 6.141) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Epiroc PV351.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 28.468 horas.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Análisis de Pareto por Sistemas Relevantes

A continuación se detallan los sistemas y subsistemas más relevantes obtenidos a partir del análisis de Pareto realizado en el capítulo anterior. Los subsistemas presentados a continuación se obtubieron a partir de un análisis de Pareto enfocado a los sistemas relevantes por equipos, el cual se puede apreciar en el "anexo B".

5.1.1 Subsistemas de sistemas relevantes, PO12

Compresor: Bomba de lubricación, control, espera de repuesto (bomba de lubricación).
Motor de Inducción: Rodamientos.
Sistema de Izado: Motor eléctrico de izado.

5.1.2 Subsistemas de sistemas relevantes, PO17

Motor Diesel: Espera de repuesto (motor de arranque), harness de motor, alternador.
Cabina: Espera de repuesto (módulo, cable CANO), pantalla operación
Compresor: Espera de repuesto (MC2 control de modulación).

5.1.3 Subsistemas de sistemas relevantes, PO25

Rodado: Bastidor LC.
Sistema de Rotación: Motor eléctrico rotación.
Sistema Hidráulico: Tanque hidráulico, 4 spool.
Mástil: Estructura portabarra, electroválvulas de activación seguro torre.

Cabina: Fuente de poder pantalla.

Compresor: Líneas hidráulicas.

5.1.4 Subsistemas de sistemas relevantes, PO21

Sistema de Izado: Rack piñón.

Motor Diesel: Espera de repuesto (componente de motor).

Mástil: Estructura portabarra, llave caymán, porta barras, encoder, llave de corte, deskhole, cremallera.

5.1.5 Subsistemas de sistemas relevantes, PO13

Sistema de Rotación: Caja de rotación.

Mástil: Cadenas de izado, llave caymán.

PTO Bajo nivel.

5.1.6 Subsistemas de sistemas relevantes, PO16

Mástil: Cilindros de avance, cadenas de empuje.

Sistema Hidráulico: Mangueras, válvula tanque hidráulico.

Sistema de Izado: Motor hidráulico izado, espera de repuesto (sin información), electroválvulas activación sistema hidráulico, carro izado.

Sistema de Rotación: Caja de rotación.

5.1.7 Subsistemas de sistemas relevantes, PO18

Rodado: Zapatas y pasadores, bastidor LC.

Cabina: Cables comunicación PLC.

Sistema Hidráulico: Bomba propel.

5.1.8 Subsistemas de sistemas relevantes, PO20

Motor Diesel: Espera de repuesto (motor diesel).

5.1.9 Subsistemas de sistemas relevantes, PO23

Sistema de Izado: Motor eléctrico izado.
Sistema de Rotación: Motor eléctrico de rotación.
Sistema Hidráulico: 4 spool, switch temperatura aceite hidráulico.

5.2 Diagramas Jack Knife

A continuación se detallan los resultados obtenidos a partir de los diagramas de Jack Knife confeccionados con los modos de fallas asociados a los sistemas relevantes por equipos, los cuales se obtuvieron gracias al análisis de Pareto realizado en el capítulo anterior.

5.2.1 Priorización subsistemas PO12

- **Críticas:**
    1. Motor eléctrico de izado.
    2. Bomba de lubricación.
    3. Espera de repuesto.
- **Crónicas:**
    1. Control.
    2. Líneas hidráulicas.
    3. Líneas neumáticas.
- **Agudas:**
    1. Rodamientos.

5.2.2 Priorización subsistemas PO17

- **Críticas:**
    1. Espera de repuesto.
    2. Harness de motor.
- **Crónicas:**
    1. Pantalla de operación.

2. Sensor de temperatura.
3. Joystick.
4. Alternador.
5. Falla de módulos.
6. Ductos de admisión de aire.

5.2.3 Priorización subsistemas PO25

- **Críticas:**
  1. Rueda tensora.
  2. Líneas hidráulicas.
  3. Motor eléctrico de rotación.
- **Crónicas:**
  1. 4 spool.
  2. Control.
  3. Mangueras.
  4. Deskhole.
  5. Sensor de temperatura.
- **Agudas:**
  1. Bastidor LC.
  2. Fuente de poder pantalla.
  3. Estructura porta barra.
  4. Tanque hidráulico.
  5. Electroválvulas de activación seguro torre.
  6. Espera de repuesto.

5.2.4 Priorización subsistemas PO21

- **Críticas:**
  1. Espera de repuesto.

- **Crónicas:**
    1. Llave caymán.
    2. Porta barra.
    3. Estructura porta barra.
    4. Enfriador de refrigerante.
- **Agudas:**
    1. Rack piñón.

5.2.5 Priorización subsistemas PO13

- **Críticas:**
    1. Caja de rotación.
- **Crónicas:**
    1. Motor hidráulico de rotación.
- **Agudas:**
    1. Cadenas de izado.
    2. Bajo nivel.
    3. Bomba propel LNC.
    4. Espera de repuesto.

5.2.6 Priorización subsistemas PO16

- **Crónicas:**
    1. Mangueras.
    2. Caja de rotación.
    3. Motor hidráulico de rotación.
- **Agudas:**
    1. Válvula tanque.
    2. Cilindros de avance.

3. Motor hidráulico de izado.
4. Bomba propel.
5. Espera de repuesto.
6. Cadenas de empuje.
7. Porta barras.

5.2.7 Priorización subsistemas PO18

- **Críticas:**
  1. Zapatas y pasadores.
  2. Bastidor LC.
- **Crónicas:**
  1. Mangueras.
  2. Pantalla de operación.
- **Agudas:**
  1. Cables de comunicación PLC.
  2. Rueda propulsora y pernos.
  3. Bomba propel.

5.2.8 Priorización subsistemas PO20

- **Agudas:**
  1. Espera de repuesto.

5.2.9 Priorización subsistemas PO23

- **Críticas:**
  1. Motor eléctrico de izado.
  2. Motor eléctrico de rotación.
- **Crónicas:**

1. Switch de temperatura aceite hidráulico.
2. Tanque hidráulico.

- **Agudas:**

1. 4 spool.
2. Caja de rotación.

5.3 Análisis de Weibull por Flotas

En la presente sección se presentan tablas con el resumen del análisis de Weibull completo realizado a los componentes mayores de cada flota según la base de datos de cambio de componentes entregada por jefatura de CMDIC. En las siguientes tablas resumen se observan en color rojo el resumen de los análisis presentados en la sección anterior (caso más representativo) y en color negro el resumen con los análisis entregados en el anexo A.

El detalle de los parámetros mostrados en cada tabla se presenta a continuación:

- **Equipo:** Equipos analizados en cada flota, se hace la distinción debido a que algunas flotas no contaban con información de todos sus equipos o los componentes de algún equipo en específico eran distintos al del resto de la flota.

- **Rango de análisis:** Presenta cada caso analizado, en cuanto a cantidad de horas operativas del componente antes del reemplazo. Se puede observar que se utilizó como parámetro de cesgo el % de vida útil, es decir, se analizaron distintos casos siempre que los datos lo permitieran, estos son:

  1. Total de datos
  2. Datos con valores 70% mayores o 70% menores a la vida útil del componente
  3. Datos con valores 50% mayores o 50% menores a la vida útil del componente
  4. Datos con valores 30% mayores o 30% menores a la vida útil del componente
  5. En casos especiales se decidió eliminar o cesgar cierto número de datos, los cuales al realizar la regresión lineal se observaba claramente cómo estos distaban mucho de la tendencia central del conjunto.

- **nro. datos:** Cantidad de datos analizada, esto sirve para tener en cuenta que tan representativa puede ser la muestra en cuestión, además de dar información respecto a la cantidad de datos que se filtra en cada caso.

- **Vida útil:** Corresponde a la vida útil actual de los componentes, de acuerdo al plan matriz de mantención.
- β**:** Parámetro de forma del modelo de Weibull, este parámetro sirve, como bien indica su nombre, para ajustar la forma de la curva según los datos en análisis
- η**:** Vida característica del modelo de Weibull, este parámetro indica el valor o la vida en la cual falló o se reemplazó el 63,2% de los datos
- r^2**:** Coeficiente de regresión lineal, obtenido de la gráfica logarítmica de dispersión
- **MTBF:** Tiempo medio entre fallas, obtenido a partir de función Gamma utilizando parámetros de forma y de escala del análisis Weibull.
- **R(V.U):** Confiabilidad evaluada en vida útil actual. Es decir, probabilidad de que el componente no falle a la cantidad de horas definida como vida útil en el plan actual de mantenimiento.

5.3.1 Bucyrus 49HR

Compresor

Tabla 5.1: Resumen análisis de Weibull, compresor Bucyrus 49HR. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO07	Total	3	25.000	1,7888	21.600	0,8872	19.214	27,3%
PO01 PO07	Total	10	25.000	0,5394	15.245	0,8972	26.759	27,1%
	+/-70% V.U	6	25.000	2,3711	23.297	0,9127	20.648	30,7%
	+/- 50% V.U	5	25.000	2,5752	25.410	0,8713	22.563	38,3%
	+/- 30% V.U	4	25.000	2,7632	27.458	0,9668	24.438	46,2%
PO12 PO15 PO19	Total	8	25.000	1,5226	23.553	0,9840	21.225	33,5%
	+/- 70% V.U	6	25.000	2,1591	22.159	0,9497	19.625	27,3%
	+/- 50% V.U	5	25.000	2,5071	24.521	0,8450	21.758	35,0%
	+/- 30% V.U	2	25.000	6,9094	22.782	1,0000	21.297	15,0%

A partir de la información presentada en la tabla 5.1 se observa que al analizar el equipo PO07 se obtiene un coeficiente de correlación lineal muy bajo, razón por la cual se decidió agregar en el análisis la información del equipo PO01, ya que ambos poseen el mismo modelo de compresor. Al realizar este nuevo análisis sin censurar datos no se logra mejorar considerablemente la correlación

entre los datos y, además, los resultados distan mucho del comportamiento esperado para dicho componente.

Por lo anterior se decide realizar el análisis censurando algunos datos, observando mejores resultados, a continuación se detalla el caso con mejor correlación entre datos:

- β = 2,76 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 24.438 horas, con coeficiente de correlación de 0,9668 (error = 3,32%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 53,8%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

Al realizar el mismo análisis en los demás equipos (PO12, PO15, PO19) se observa en general una buena correlación entre los datos de estudio, obteniendo un valor para la vida característica del componente entre 22.000 y 24.000 horas aproximadamente.

- β = 1,52 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 21.225 horas, con coeficiente de correlación de 0,984 (error = 1,60%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 66,6%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

Motor Eléctrico

Tabla 5.2: Resumen análisis de Weibull, motor eléctrico Bucyrus 49HR. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO01 PO07	Total	7	15.000	0,7271	20.554	0,8947	25.128	45,1%
	+/- 70% V.U	4	15.000	0,9337	29.447	0,8804	30.393	58,7%
	+/- 50% V.U	3	15.000	1,0275	39.534	0,8655	30.098	69,1%
PO12 PO15 PO19	Total	29	15.000	0,4843	3.649	0,9614	7.754	13,8%
	+/- 70% V.U	7	15.000	1,8437	14.873	0,9451	13.212	36,2%
	+/- 50% V.U	4	15.000	2,4734	15.946	0,9417	14.145	42,3%

Respecto al motor eléctrico del equipo PO01, se puede observar a partir de la tabla 5.2 que en ningún caso de estudio fue posible alcanzar una correlación lineal sobre el 90% de los datos

de estudio, no obstante, el coeficiente de correlación lineal fluctúa entre 0,87 y 0,89, obteniendo un valor de vida característica entre 20.000 y 39.000 horas, al igual que el MTBF. Es esta gran diferencia entre los resultados, sumado a la imposibilidad de encontrar una correlación mayor entre los datos de estudio, la razón por la cual no es posible tomar una decisión respecto al cambio del plan actual de mantención para el motor eléctrico.

Cabe destacar que en cualquiera de los casos se alcanza la vida útil esperada, por lo tanto podría ser conveniente realizar un seguimiento especial a este componente, con el fin de determinar el comportamiento real y en base a esto analizar la posibilidad de extender su TBO.

Al analizar los resultados para los equipos PO12, PO15 y PO19 se pudo obtener una muy buena correlación entre los datos (entre 0,94 y 0,99), pero a pesar de esto se observan comportamientos muy distintos entre los casos de estudio, ya que los datos varían entre 5.200 horas y 22.800 horas. Esta desviación puede deberse a fallas infantiles en el componente o errores operativos, los cuales ya deben estar subsanados. Es por esto que se toma como base de análisis el caso con una censura del 70%, obteniendo los siguientes resultados:

- β = 1,84 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 13.212 horas, con coeficiente de correlación de 0,9668 (error = 5,49%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 63,8%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

PTO

Tabla 5.3: Resumen análisis de Weibull, PTO Bucyrus 49HR. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO07	Total	2	12.000	1,1563	34.356	1,0000	32.645	74,4%
PO12 PO15 PO19	Total	14	12.000	0,7613	6.468	0,9212	7.608	20,2%
	+/- 70% V.U	8	12.000	2,7959	11.861	0,9854	10.548	35,6%
	+/- 50% V.U	7	12.000	3,437	12.548	0,9833	11.279	42,4%
	+/- 30% V.U	5	12.000	5,3201	12.184	0,9073	11.227	39,8%

Al analizar la tabla 5.3 se observa una gran diferencia entre la vida útil proyectada (12.000 horas) y la vida característica (34.000 horas) del PTO para el equipo PO07. Al analizar la base de datos se

observa que para este caso sólo se contaba con 2 datos de reemplazos anteriores, razón por la cual no se puede establecer una clara tendencia. Sin embargo se nota que ambos casos se encuentran por sobre la vida útil actual del componente, obteniendo un MTBF de 32.645 horas.

Al analizar los otros equipos (PO12, PO15, PO19) y censurar datos estratégicamente, es posible observar una clara tendencia, y en el caso más representativo (+/-70%) se observa:

- β = 2,79 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 10.548 horas, con coeficiente de correlación de 0,9854 (error = 1,46%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 64,4%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

5.3.2 Epiroc DML

Motor Diesel

Tabla 5.4: Resumen análisis de Weibull, motor diesel Epiroc DML. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO20	Total	11	12.000	1,6166	9.759	0,9237	8.742	24,7%
PO21	+/- 70% V.U	8	12.000	3,3665	11.773	0,8173	10.571	34,4%
PO22	+/- 30% V.U	4	12.000	4,479	12.376	0,9407	11.291	41,9%

En la tabla 5.4 se observa que, luego de realizar la censura de datos extremos, se obtiene una tendencia clara en cuanto al comportamiento del componente. Se observa que la mejor correlación entre datos se obtiene al censurar con una desviación del 30% respecto a la vida útil, obteniendo lo siguiente:

- β = 4,48 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 11.291 horas, con coeficiente de correlación de 0,9407 (error = 5,93%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 58,1%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

5.3.3 Cat MD6640

Compresor

Tabla 5.5: Resumen análisis de Weibull, compresor Cat MD6640. (fuente: elaboración propia)

Equipo	Rango de análisis	n° datos	Vida útil	β	η	r^2	MTBF	R(V.U)
PO20 PO21 PO22	Total	3	25.000	29,833	16.532	0,8177	16.230	0,0%

La tabla 5.5 muestra una clara tendencia en los datos, obteniendo una vida característica cercana a las 16.000 horas para el compresor y un MTBF de 16.230 horas, muy por debajo de las 25.000 horas consideradas actualmente como vida útil de dicho componente, por lo cual se sugiere cambiar TBO de plan matriz. Teniendo en cuenta lo siguiente:

- β = 29,8 indica tasa de falla asociada al desgaste acelerado del componente.
- MTBF = 16.230 horas, con coeficiente de correlación de 0,8177 (error = 18,23%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 100%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

PTO

Tabla 5.6: Resumen análisis de Weibull, PTO Cat MD6640. (fuente: elaboración propia)

Equipo	Rango de análisis	n° datos	Vida útil	β	η	r^2	MTBF	R(V.U)
PO20	Total	6	12.000	1,7636	9.452	0,9214	8.415	21,8%
PO21	+/- 70% V.U	5	12.000	2,231	10.651	0,7604	9.433	27,1%
PO22	+/- 50% V.U	4	12.000	2,0904	11.895	0,6476	10.535	36,1%

En la tabla 5.6 se observa que la mejor correlación entre datos fue obtenida al analizar el total de datos, obteniendo un coeficiente de correlación lineal de 0,92 aproximadamente, mientras que en los demás casos este parámetro no superó el valor de 0,76. Teniendo en cuenta lo anterior, se observa que en ningún caso se alcanzó la vida útil establecida para este componente, por lo tanto se sugiere cambiar TBO en plan matriz, considerando el caso más representativo:

- β = 1,76 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 8.415 horas, con coeficiente de correlación de 0,9214 (error = 7,86%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 78,2%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

5.3.4 Sandvik D75KS

Cabezal de Rotación

Tabla 5.7: Resumen análisis de Weibull, cabezal de rotación Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO13 PO16	Total	7	12.000	1,4707	11.031	0,8121	9.983	32,2%
	+/- 70% V.U	6	12.000	4,4918	11.068	0,8799	10.100	23,8%
	+/- 30% V.U	5	12.000	4,1923	12.476	0,8313	11.339	42,8%

Al observar la tabla 5.7 se observa que no se pudo obtener una buena correlación entre los datos a pesar de realizar filtros con esta finalidad. En el mejor de los casos el coeficiente de correlación lineal alcanzó el valor de 0,88, mientras que en el peor caso sólo llegó a 0,81. A pesar de lo anterior se nota una tendencia en cuanto al comportamiento del cabezal de rotación, observando lo siguiente:

- β = 4,5 indica tasa de falla asociada al desgaste acelerado del componente.
- MTBF = 10.100 horas, con coeficiente de correlación de 0,8799 (error = 12,01%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 76,2%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

Compresor

Tabla 5.8: Resumen análisis de Weibull, compresor Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO13 PO16	Total	3	12.000	1,1076	33.852	0,9803	32.591	72,8%
	+/- 70% V.U	2	12.000	1,0851	23.044	1,0000	22.337	61,1%

La tabla 5.8 muestra que la vida característica del compresor varía entre 23.000 y 34.000 horas aproximadamente, mientras que el MTBF lo hace entre 22.000 y 32.000 horas. Lo anterior resulta extraño a primera vista, entendiendo que la vida útil para dicho componente se estimaba en 12.000 horas. Al analizar más en detalle este caso es posible observar que solamente se contaba con un total de 3 datos, los cuales distan mucho entre ellos y no aportan información respecto a una tendencia clara.

Es por lo anterior que no se puede ofrecer un análisis más en detalle y conclusiones apropiadas en este caso, sin tener más información respecto a por qué los valores de cambio de componentes distan tanto entre ellos.

Por estas razones se sugiere realizar un monitoreo a dicho componente, para analizar la posibilidad de elevar su TBO, considerando como línea base lo siguiente:

- β = 1,1 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 32.591 horas, con coeficiente de correlación de 0,9803 (error = 1,97%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 27,2%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

Motor diesel

Tabla 5.9: Resumen análisis de Weibull, motor diesel Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO13 PO16	Total	7	12.000	1,6781	13.658	0,9611	12.197	44,7%
	+/- 70% V.U	5	12.000	3,357	11.914	0,9227	10.696	35,9%
	+/- 30% V.U	4	12.000	3,6315	12.769	0,9143	11.512	45,0%

En la tabla 5.9 se observa una clara tendencia respecto a la vida característica del motor diesel, la cual bordea las 12.000 horas con una buena correlación entre los datos, entre 0,91 y 0,96. Respecto al análisis del caso más representativo se destaca:

- β = 1,7 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 12.197 horas, con coeficiente de correlación de 0,9611 (error = 3,89%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 55,3%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

PTO 3 holes

Tabla 5.10: Resumen análisis de Weibull, PTO 3 holes, Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO13 PO16	Total	12	12.000	0,5124	8.017	0,8090	15.340	29,2%
	+/- 70% V.U	5	12.000	2,5337	8.606	0,8260	7.639	9,8%
	+/- 50% V.U	2	12.000	3,5846	11.654	1,0000	10.499	32,9%

La tabla 5.10 muestra que al realizar el análisis de Weibull con la totalidad de los datos no se logra una buena correlación entre ellos (0,81), al realizar un filtro con una desviación del 70% de la vida útil se logra mejorar un poco este parámetro (0,83), pero aún se considera insuficiente. Cabe destacar que el filtro de datos +/- 50% de la vida útil otorga una correlación del 100% entre los datos, pero este valor resulta un poco engañoso, ya que se obtiene debido a que en este análisis sólo se tienen 2 datos, por ende este parámetro no podría alcanzar otro valor distinto a 1.

Respecto a lo anterior, se considera que el mejor comportamiento obtenido, se encuentra con una vida característica de 8.600 horas aproximadamente, por debajo de la vida útil estimada para el PTO 3 holes (12.000 horas) y un coeficiente de correlación lineal de 0,83:

- β = 2,5 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 7.639 horas, con coeficiente de correlación de 0,826 (error = 17,4%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 90,2%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

PTO 4 holes

Tabla 5.11: Resumen análisis de Weibull, PTO 4 holes, Sandvik D75KS. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO13 PO16	Total	7	12.000	1,1326	10.155	0,9086	9.708	29,9%
	+/- 70% V.U	3	12.000	1,938	12.461	0,8811	11.051	39,5%
	+/- 50% V.U	2	12.000	15,354	13.236	1,0000	12.791	80,1%

En la tabla 5.11 se observa que la mejor correlación entre datos se obtuvo sin la necesidad de aplicar filtros, llegando a lo siguiente:

- β = 1,1 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 9.708 horas, con coeficiente de correlación de 0,9086 (error = 9,14%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 70,1%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

5.3.5 Epiroc PV271

Compresor

Tabla 5.12: Resumen análisis de Weibull, compresor Epiroc PV271. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO17	Total	2	12.000	0,3858	19.950	1,0000	73.486	44,0%

Al observar la tabla 5.12 se observa que sólo se contaban con 2 datos históricos al momento de realizar el análisis, además estos datos claramente no representan una tendencia clara (1.264 horas y 34.295 horas respectivamente), razón por la cual cualquier conclusión obtenida a partir de estos datos podría no ser acertada o podría ser incapaz de representar la realidad del compresor en análisis. A pesar de lo anterior, a continuación se muestra un resumen de acuerdo a lo observado:

- β = 0,38 indica tasa de falla asociada a fallas infantiles.
- MTBF = 73.486 horas y vida característica de 19.950 horas, con coeficiente de correlación de 1 (error = 0%. Obs: sólo dos datos en análisis)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 56%.
- Tasa de falla corresponde al tipo F, lo que indica mortalidad infantil, seguida de fallas aleatorias.

Motor diesel

Tabla 5.13: Resumen análisis de Weibull, motor diesel Epiroc PV271. (fuente: elaboración propia)

Equipo	Rango de análisis	n° datos	Vida útil	β	η	r^2	MTBF	R(V.U)
PO17	Total	3	12.000	0,7015	9.446	0,9904	11.933	30,6%
	+/- 70% V.U	2	12.000	0,905	15.545	1,0000	16.307	45,3%

En la tabla 5.13 se muestran los resultados de 2 análisis realizados, el primero con los tres datos históricos obtenidos de la base de datos y el segundo análisis descartando el dato más extremo. Si bien la correlación de datos es muy buena en ambos casos (0,99 y 1). Al realizar el análisis sin filtrar datos se tiene lo siguiente:

- β = 0,7 indica tasa de falla asociada a fallas infantiles.
- MTBF = 11.933 horas, con coeficiente de correlación de 0,9904 (error = 0,96%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 69,4%.
- Tasa de falla corresponde al tipo F, lo que indica mortalidad infantil, seguida de fallas aleatorias.

5.3.6 Epiroc PV351

Compresor

Tabla 5.14: Resumen análisis de Weibull, compresor Epiroc PV351. (fuente: elaboración propia)

Equipo	Rango de análisis	n° datos	Vida útil	β	η	r^2	MTBF	R(V.U)
PO18	Total	2	12.000	0,8174	25.506	1,0000	28.468	58,3%

En la tabla 5.14 se observa una clara diferencia entre el MTBF (28.468 horas) y la vida útil del componente (12.000 horas). Lo anterior se debe a que sólo se contaba con 2 datos, los cuales distan mucho entre ellos (6.900 y 32.900 horas respectivamente). Debido a lo anterior resulta difícil concluir respecto a una tendencia en los datos, ya que no se cuenta con información suficiente para ello. Por todo lo anterior parece prudente no intervenir el plan de mantenimiento actual para el compresor en cuestión.

Motor diesel

Tabla 5.15: Resumen análisis de Weibull, motor diesel Epiroc PV351. (fuente: elaboración propia)

Equipo	**Rango de análisis**	**n° datos**	**Vida útil**	β	η	r^2	**MTBF**	**R(V.U)**
PO18	Total	3	12.000	1,027	16.860	0,9220	16.678	49,4%
	+/- 70% V.U	2	12.000	0,9078	12.437	1,0000	13.025	38,0%

En la tabla 5.15 se muestra el análisis realizado al motor diesel, analizando específicamente 2 casos, el primero con el total de datos (3 datos) y el segundo eliminando el dato más extremo.

En ambos casos se obtiene una correlación aceptable entre los datos (0,92 y 1), aunque parece relevante recordar que al analizar sólo dos datos el coeficiente de correlación lineal por defecto dará siempre 1.

Respecto al MTBF obtenido, este varía entre 13.025 y 16.678 horas, en ambos casos obteniendo valores por sobre la vida útil definida (12.000 horas). Respecto al análisis sin censura de datos se destaca lo siguiente:

- β = 1,03 indica tasa de falla asociada al desgaste del componente.
- MTBF = 16.678 horas, con coeficiente de correlación de 0,922 (error = 7,8%)
- Según la curva de confiabilidad, con TBO actual se tiene una probabilidad de falla de 50,6%.
- Tasa de falla corresponde al tipo C, lo que indica probabilidad acumulada de falla en aumento.

Capítulo 6

Conclusiones

Se observó el predominio de "espera de repuesto", si bien se presentan muchas horas por este item, no se logra encontrar algún componente en específico que falle seguido y que genere en gran medida estas detenciones. En otras palabras, se presentan varias horas de espera de repuesto, pero los repuestos requeridos no son siempre los mismos; razón por la cual no se puede definir un stock crítico para un componente en específico. Teniendo en cuenta lo anterior y luego de conversar con las personas involucradas en el área de mantenimiento, se pudo notar la necesidad de vincular al área de abastecimiento en este punto, para generar alertas automáticas en el ERP utilizado (ELLIPSE) y que se pueda generar una orden de compra de manera automática al alcanzar el stock mínimo permitido, ya que actualmente se tienen definidos ciertos stock, pero esta labor se realiza de manera manual y muchas veces suele retrasarse u olvidarse hasta el momento de necesitar algún componente sin stock en bodega. Al mejorar esta gestión de repuestos se espera aportar directamente a la disminución del MTTR.

El segundo item con mayor cantidad de horas de mantenimiento imprevisto se encuentran sin información respecto a su modo de falla (5,34%). Es por esto que se recomienda realizar capacitaciones o re-instrucciones al personal a cargo de ingresar dicha información en el sistema. De esta manera se pretende llevar una buena trazabilidad en cuanto a mantenimientos imprevistos y poder tomar mejores decisiones a partir de una base de datos más confiable.

Se observa un modo de falla recurrente en la caja de rotación debido a fuga de aceite. Lo anterior se debe a que se mezcla aceite con agua, disminuyendo la viscocidad del aceite, lo cual contribuye a que se presenten fugas en sello swivel. Al ser esta falla recurrente parece importante analizar acciones para evitarla, pero teniendo en cuenta los bajos costos de sello nuevo, bajos tiempos de cambio de componente y facilidad para detectar esta condición, la decisión del área de mantenimiento es seguir realizando esta tarea de manera correctiva, considerando la necesidad de tener stock necesario de sello swivel en bodega.

Se puede notar la recurrencia de fallas en mangueras hidráulicas, ya que este modo de falla se observó como falla crítica o crónica en varios equipos (PO12, PO25, PO16 y PO18). Por lo anterior se propone contar siempre con stock de mangueras para recambio, disminuyendo de esta manera el MTTR.

A partir de los análisis de Weibul realizados para el TBO de los componentes mayores por flotas y pensando en mejorar la confiabilidad de las flotas, se entregan las siguientes recomendaciones:

Bucyrus 49HR:

Se recomienda disminuir la vida útil del compresor de 25.000 a 20.000 horas, para los equipos PO12, PO15 y PO19; elevando de esta manera la confiabilidad del componente de 34% a 46% aproximadamente.

Se recomienda disminuir la vida útil del motor eléctrico de los equipos PO12, PO15 y PO19 de 15.000 a 13.000 horas; elevando de esta manera la confiabilidad del componente de 36% a 46% aproximadamente.

Teniendo en cuenta que a pesar de no llegar a resultados concluyentes respecto al PTO del equipo PO01, se recomienda elevar su TBO de 12.000 a 14.000 horas y realizar monitoreo de condiciones mediante análisis de vibraciones y termografía, considerando que según la data histórica este componente no ha fallado antes de ese valor; obteniendo de esta manera una confiabilidad aproximada de 70%.

Se recomienda disminuir el TBO de 12.000 a 10.000 horas para el PTO asociado a los equipos PO12, PO15 y PO19; elevando de esta manera la confiabilidad del componente de 35% a 53% aproximadamente.

Epiroc DML:

Se recomienda realizar un midlife al motor diesel (a las 6.000 horas), con lo cual se espera obtener una confiabilidad superior al 90% para dicho componente.

Cat MD6640:

Se recomienda bajar el TBO del compresor de 25.000 a 16.000 horas; elevando la confiabilidad del componente de 0% a 69%.

Se recomienda disminuir la vida útil del PTO de 12.000 a 8.000 horas y realizar monitoreo de condiciones mediante análisis de vibraciones y termografía; aumentando de esta manera la confiabilidad del componente de 22% a 48% aproximadamente.

Sandvik D75KS:

Se recomienda disminuir el TBO del cabezal de rotación de 12.000 a 10.000 horas; aumentando de esta manera la confiabilidad del componente de 24% a 53% aproximadamente.

Respecto al compresor se aprecia que hay pocos datos y varían mucho entre ellos, a pesar de esto tanto la vida característica como el MTBF obtenido sobrepasan el valor definido actualmente en el plan de mantenimiento. En base a lo anterior se propone realizar un aumento gradual del TBO, aumentando de 12.000 a 15.000 horas en un inicio y realizar monitoreo de condiciones mediante análisis de vibraciones y termografía; obteniendo una confiabilidad aproximada de 67%. Se aconseja realizar un seguimiento al caso y averiguar a qué se debe la gran variación en los datos. Lo anterior considerando la posibilidad de continuar elevando el TBO de manera gradual (entre un 20% y un 30%).

Se recomienda realizar un midlife al motor diesel (6.000 horas), con lo cual se espera obtener una confiabilidad cercana al 78%.

Se recomienda bajar la vida útil del PTO 3 holes de 12.000 a 7.000 horas y realizar monitoreo de condiciones mediante análisis de vibraciones y termografía; aumentando de esta manera la confiabilidad del componente de 10% a 55% aproximadamente.

Se recomienda bajar la vida útil del PTO 4 holes de 12.000 a 9.000 horas y realizar monitoreo de condiciones mediante análisis de vibraciones y termografía; aumentando de esta manera la confiabilidad del componente de 30% a 42% aproximadamente.

Epiroc PV271:

Se recomienda realizar midlife a motor diesel (6.000 horas), con lo cual se espera elevar la confiabilidad de 31% a 48% aproximadamente para dicho componente.

Epiroc PV351:

Se recomienda elevar el TBO del motor diesel de 12.000 a 16.000 horas y realizar midlife (8.000 horas), con lo cual se espera aumentar la confiabilidad de 49% a 63% aproximadamente para dicho componente. Para lo anterior se debe tener en cuenta que existen fallas históricas en motores debido a perdidas de lubricación en metales de bancadas (después de TBO) y desgaste en camisas de motor; por lo tanto se propone además, realizar monitoreo de condiciones mediante tribología en periodos más cortos que lo indicado en el plan actual de mantenimiento, en conjunto con análisis de vibraciones y termografía para evitar que se produzcan estas fallas al aumentar su TBO.

Referencias

[1] Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Reporte anual de desarrollo sustentable 2020. Iquique, Chile.

[2] CONTRERAS, Jose L. Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 2012. 95p.

[3] Drilling Solutions, Presentación Perforadora Ingersoll Rand PV351. Minera Escondida, julio de 2003.

[4] Atlas Copco Drilling Solutions, LLC. Manual de instrucciones MODELO: PV351 Diésel con RCS y EARS. 2100 North First Street Garland, Texas, 75040.

[5] ANÓNIMO. Ciclo de Deming: Metodología de mejora continua — PDCA - PHVA [en línea] <https://www.ingenieriadecalidad.com/2020/02/ciclo-de-deming.html> [consulta: 21 febrero 2022]

[6] PASCUAL, Rodrigo. El Arte de Mantener. Versión 2.85. Dpto. Ing. Mecánica, U. de Chile. Santiago, Chile, abril 2005. 817p.

[7] WAGENBACH, Jürgen. Reliability analysis, Failure rate, MTBF [en línea] <https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360017808654-Reliability-analysis-Failure-rate-MTBF> [consulta: 20 mayo 2022]

[8] PISTARELLI, Alejandro J. Manual de Mantenimiento: Ingeniería, Gestión y Organización. 1ra ed. Buenos Aires, el autor, 2010. 696p.

[9] KNIGHTS, Peter F. Downtime Priorities Jack Knife diagram and Business Cycle. Associate Professor, Mining Centre, Faculty of Engineering, PUC. Santiago, Chile.

[10] EBELING, Charles E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. University of Dayton. Dayton, Estados Unidos, McGraw-Hill, 1997. 486p.

[11] Infraspeak. La curva de la bañera: cómo adaptar el mantenimiento al ciclo de vida de los activos [en línea] <https://blog.infraspeak.com/es/la-curva-de-la-banera/> [consulta: 10 marzo 2022]

[12] DEVORE, Jay L. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. 7ma ed. California Polytechnic State University. California, Estados Unidos, CENGAGE learning, 2008. 720p.

[13] TROYER, Drew. ¿Por qué es necesario el análisis de Weibull? [en línea] <https://esp.reliabilityconnect.com/por-que-es-necesario-el-analisis-de-weibull/> [consulta: 3 mayo 2022]

[14] NOWLAN, F. Stanley y HEAP, Howard F. Reliability Centered Maintence. Reporte desclasificado AD/A066 579. United Airlines. San Francisco, California, Estados Unidos, diciembre 1978. 138p.

Anexos

6.1 Anexo A

Bucyrus 49HR

Motor Eléctrico PO01-PO07 (total de datos)

Tabla 6.1: Fallas en motor eléctrico PO01 - PO07. (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.753	0,094594595	7,469009724	-2,308880127
2	1.898	0,22972973	7,54877724	-1,343181902
3	6.011	0,364864865	8,701419599	-0,789839834
4	9.229	0,5	9,130147153	-0,366512921
5	35.962	0,635135135	10,49021746	0,00819456
6	39.518	0,77027027	10,58450456	0,385841654
7	44.291	0,905405405	10,6985368	0,85787951

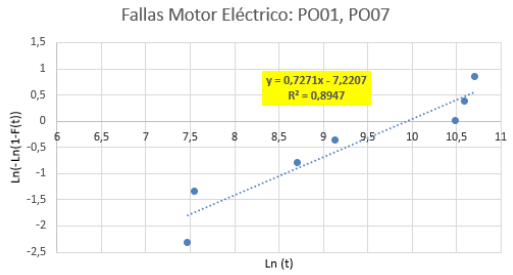

Figura 6.1: Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia)

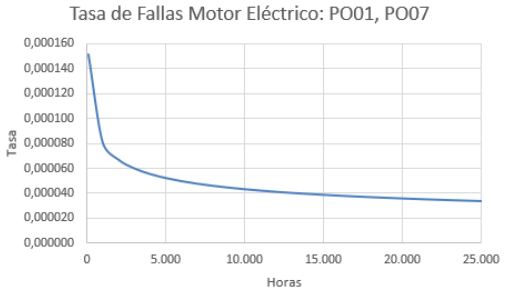

Figura 6.2: Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07. (fuente: elaboración propia)

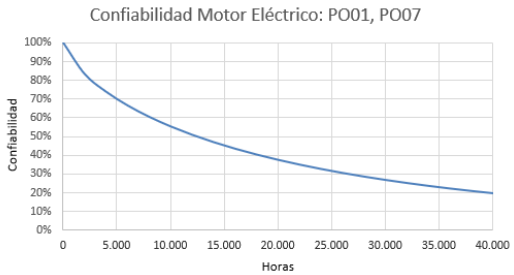

Figura 6.3: Curva de confiabilidad motor eléctrico PO01-PO07. (fuente elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.1, 6.2, 6.3) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico del equipo PO07, el cual se realizó incluyendo datos del equipo PO01, ya que ambos poseen el

mismo modelo de motor eléctrico. Esta decisión se tomó en pos de aumentar la base de datos para establecer de mejor manera el comportamiento de dicho componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 25.128 horas.

Motor Eléctrico PO01-PO07 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.2: Fallas en motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: Base de datos CMDIC)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	6.011	0,159090909	8,701419599	-1,752894273
2	9.229	0,386363636	9,130147153	-0,716717249
3	39.518	0,613636364	10,58450456	-0,050266149
4	44.291	0,840909091	10,6985368	0,608830072

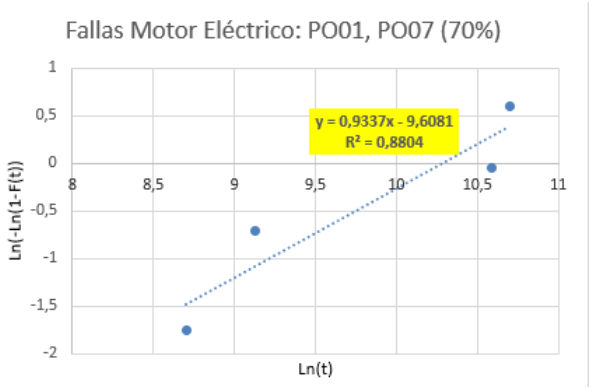

Figura 6.4: Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

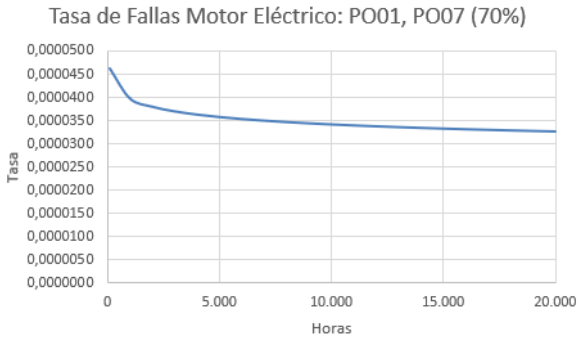

Figura 6.5: Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

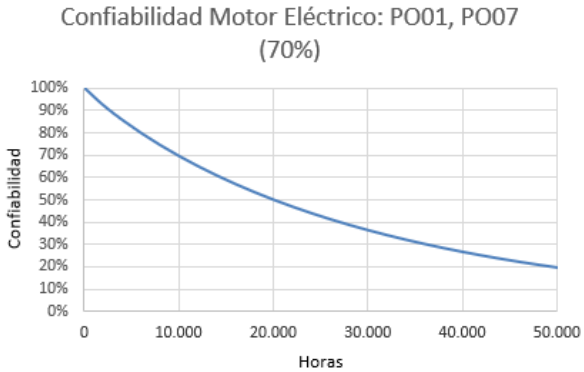

Figura 6.6: Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.4, 6.5, 6.6) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico del equipo PO07, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 30.393 horas.

Motor Eléctrico PO01-PO07 (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.3: Fallas en motor eléctrico, PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: Base de datos CMDIC)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	9.229	0,205882353	9,130147153	-1,46740178
2	39.518	0,5	10,58450456	-0,36651292
3	44.291	0,794117647	10,6985368	0,457709854

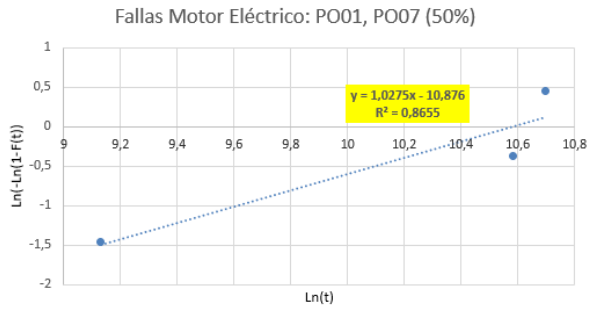

Figura 6.7: Regresión lineal, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

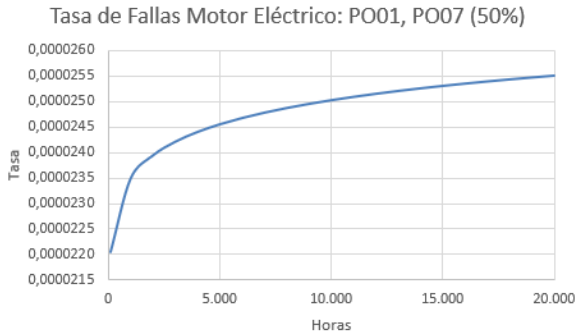

Figura 6.8: Tasa de fallas en motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

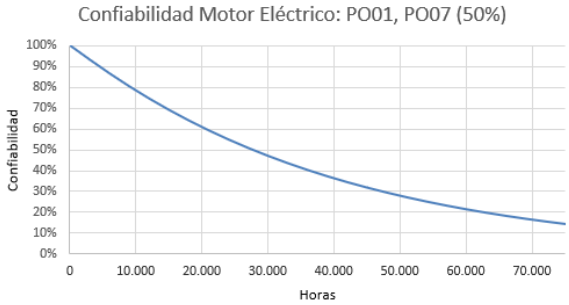

Figura 6.9: Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.7, 6.8, 6.9) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico del equipo PO07, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 39.098 horas.

Motor Eléctrico PO12-PO15-PO19 (total de datos)

Tabla 6.4: Fallas en motor eléctrico, PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5,00	0,027559055	1,609437912	-3,577483693
2	7	0,066929134	1,945910149	-2,669683806
3	23	0,106299213	3,135494216	-2,18583148
4	36,00	0,145669291	3,583518938	-1,84873045
5	74	0,18503937	4,304065093	-1,586622799
6	473	0,224409449	6,159940697	-1,369907214
7	573	0,263779528	6,350885717	-1,18343303
8	735	0,303149606	6,599870499	-1,018366276
9	1.091	0,342519685	6,995143252	-0,869072148
10	1.203,00	0,381889764	7,092573716	-0,731704114
11	1.638	0,421259843	7,401115263	-0,603486236
12	1.740	0,460629921	7,461605909	-0,482313743
13	2.149	0,5	7,672846306	-0,366512921
14	2.460,00	0,539370079	7,807916629	-0,254685391
15	3.063,90	0,578740157	8,027443893	-0,14559769
16	3.334,10	0,618110236	8,111958057	-0,038093129
17	3.900,60	0,657480315	8,268885666	0,06899061
18	5.271	0,696850394	8,569920357	0,176914335
19	6.515	0,736220472	8,781851745	0,287163174
20	6.949	0,775590551	8,84640197	0,401646493
21	8.678	0,81496063	9,06856712	0,523062447
22	10.424	0,854330709	9,25186516	0,655661466
23	15.966	0,893700787	9,678223421	0,807144125
24	20.671	0,933070866	9,93649211	0,994776877
25	22.804,49	0,972440945	10,03471273	1,278548814

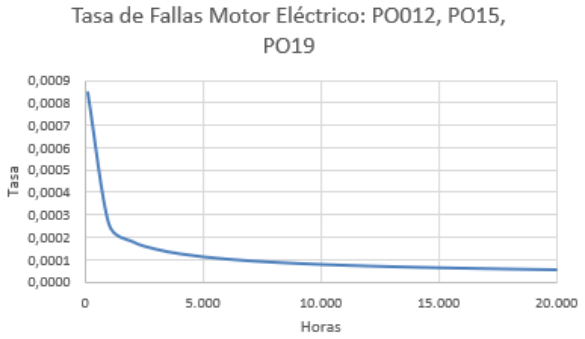

Figura 6.10: Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

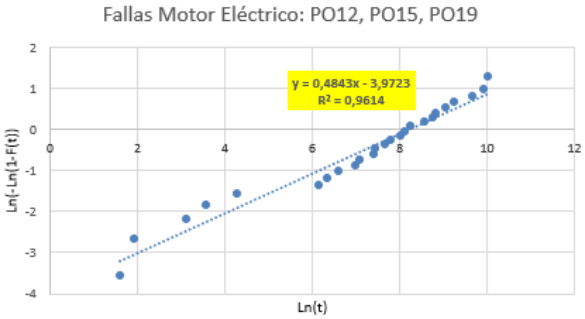

Figura 6.11: Regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

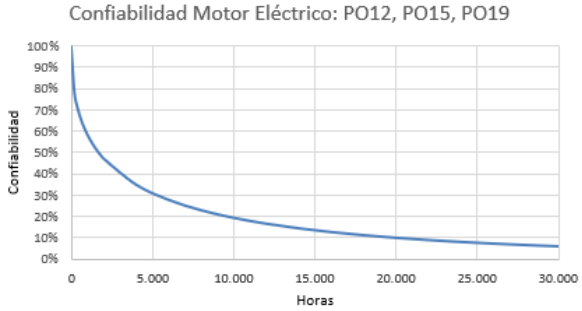

Figura 6.12: Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.10, 6.11, 6.12) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico de los equipos PO12, PO15 y PO19.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 7.754 horas.

Motor Eléctrico PO12, PO15, PO19 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.5: Data regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5.271	0,094594595	8,569920357	-2,3088801
2	6.515	0,22972973	8,781851745	-1,3431819
3	8.678	0,364864865	9,06856712	-0,7898398
4	10.424	0,5	9,25186516	-0,3665129
5	15.966	0,635135135	9,678223421	0,00819456
6	20.671	0,77027027	9,93649211	0,38584165
7	22.804,49	0,905405405	10,03471273	0,85787951

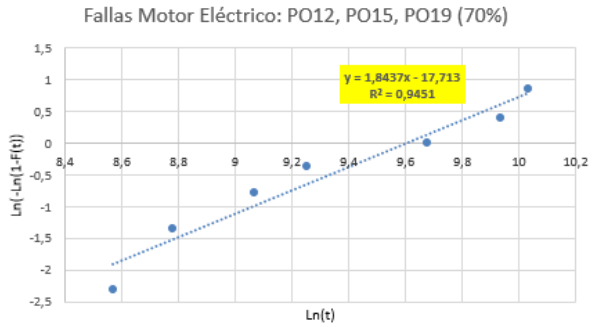

Figura 6.14: Fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19, regresión lineal (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

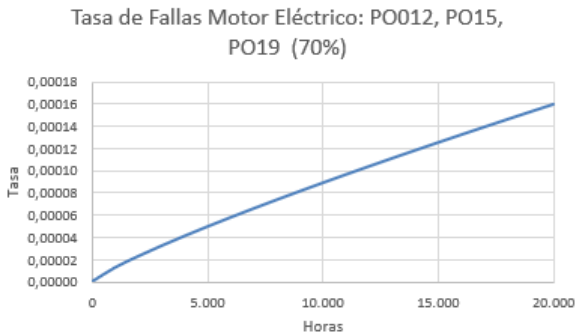

Figura 6.13: Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

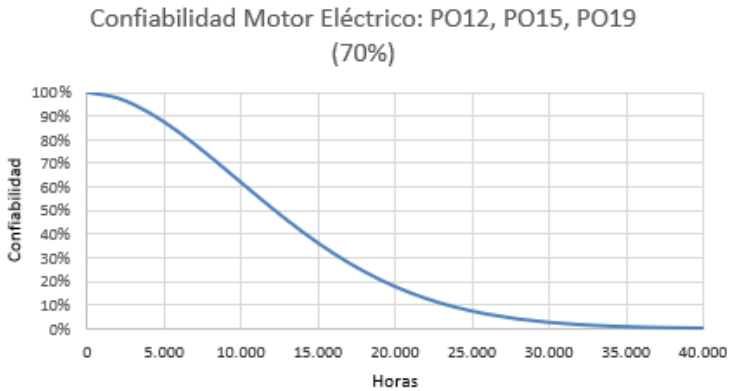

Figura 6.15: Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.13, 6.14, 6.15) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 13.212 horas.

Motor Eléctrico PO12, PO15, PO19 (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.6: Fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.678	0,159090909	9,06856712	-1,752894273
2	10.424	0,386363636	9,25186516	-0,716717249
3	15.966	0,613636364	9,678223421	-0,050266149
4	20.671	0,840909091	9,93649211	0,608830072

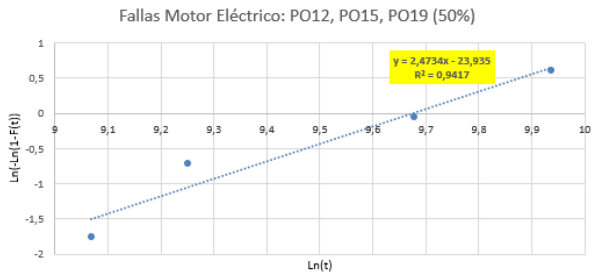

Figura 6.17: Regresión lineal, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

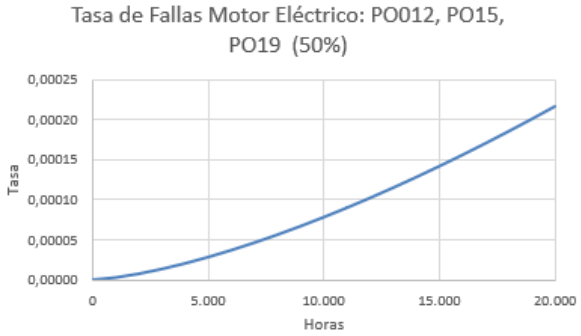

Figura 6.16: Tasa de fallas en motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

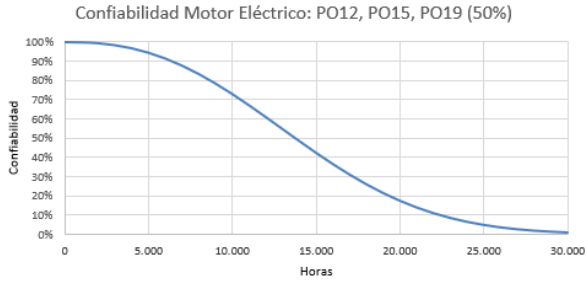

Figura 6.18: Curva de confiabilidad, motor eléctrico PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.16, 6.17, 6.18) se presenta el análisis realizado para el motor eléctrico de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 14.145 horas.

Compresor PO07 (total de datos)

Tabla 6.7: Fallas en compresor PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	11.022,51	0,205882353	9,307694824	-1,467401781
2	14.372,23	0,5	9,573053151	-0,366512921
3	29.459,35	0,794117647	10,29076652	0,457709854

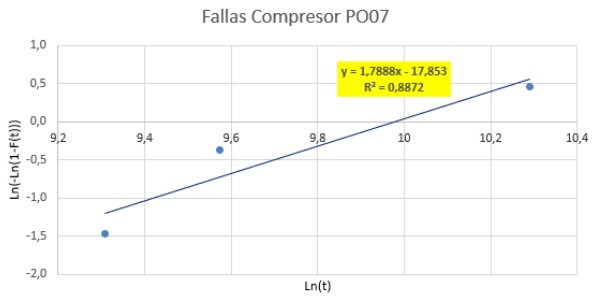

Figura 6.20: Regresión lineal, compresor PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

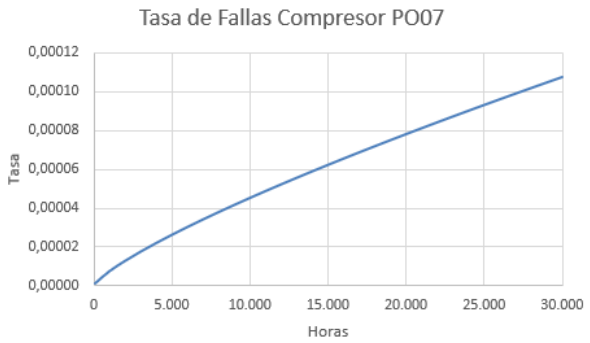

Figura 6.19: Tasa de fallas en compresor PO01 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

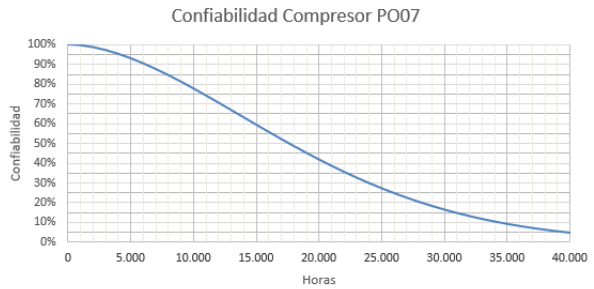

Figura 6.21: Curva de confiabilidad, compresor PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.19, 6.20, 6.21) se presenta el análisis realizado para el compresor del equipo PO07.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 19.214 horas.

Compresor PO01-PO07 (total de datos)

Tabla 6.8: Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	179,45	0,07446809	5,18989662	-2,558940818
2	325,62	0,18085106	5,78573106	-1,611994375
3	2921,82	0,28723404	7,97996199	-1,082929422
4	11022,51	0,39361702	9,30769482	-0,69266027
5	14372,23	0,5	9,57305315	-0,366512921
6	14676,774	0,60638298	9,59402152	-0,070018179
7	20532,85	0,71276596	9,92978132	0,221107814
8	29459,347	0,81914894	10,2907665	0,536540994
9	32039,391	0,92553191	10,3747214	0,954505028

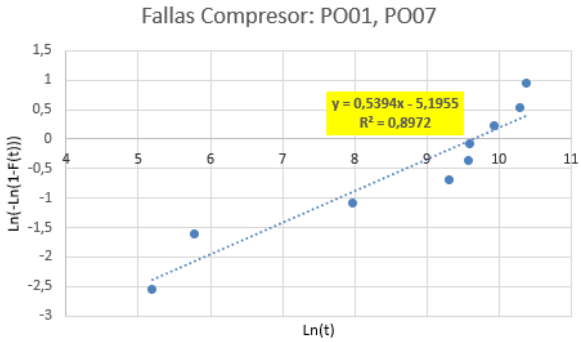

Figura 6.23: Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

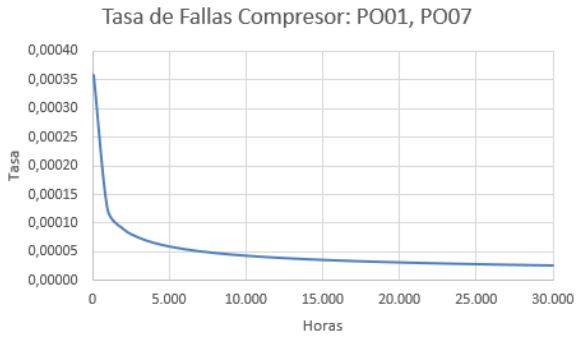

Figura 6.22: Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

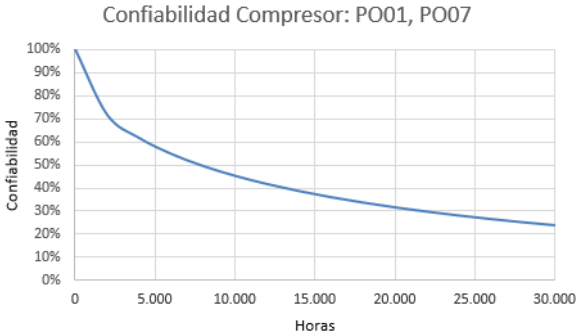

Figura 6.24: Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.23, 6.23, 6.24) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO01 y PO07.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 26.759 horas.

Compresor PO01, PO07 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.9: Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	11.022,51	0,109375	9,307694824	-2,155616006
2	14.372,23	0,265625	9,573053151	-1,175270415
3	14.676,77	0,421875	9,594021523	-0,601543551
4	20.532,85	0,578125	9,929781323	-0,147287035
5	29.459,35	0,734375	10,29076652	0,281917795
6	32.039,39	0,890625	10,37472139	0,794336831

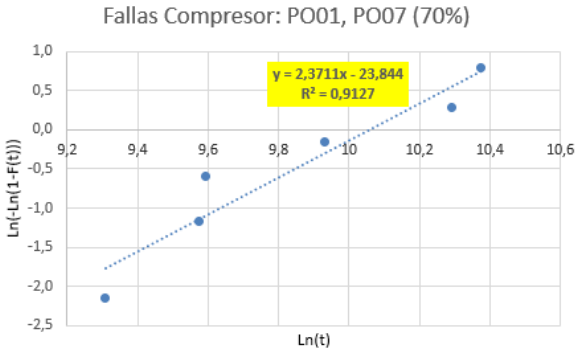

Figura 6.26: Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

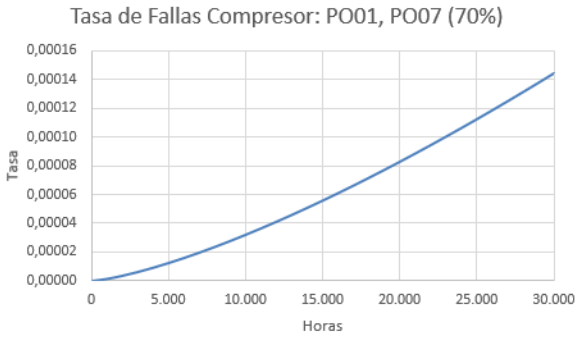

Figura 6.25: Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

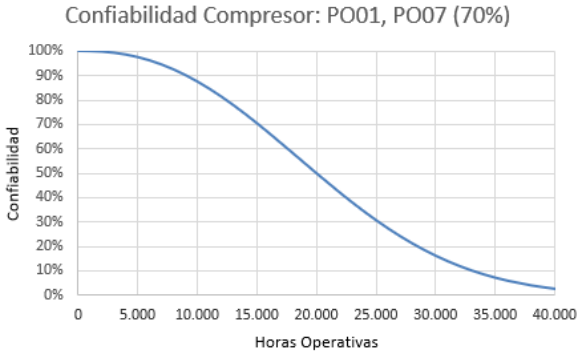

Figura 6.27: Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.25, 6.26, 6.27) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO01 y PO07, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 20.648 horas.

Compresor PO01, PO07 (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.10: Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	14.372,23	0,12962963	9,573053151	-1,974458694
2	14.676,77	0,314814815	9,594021523	-0,972686141
3	20.532,85	0,5	9,929781323	-0,366512921
4	29.459,35	0,685185185	10,29076652	0,144767396
5	32.039,39	0,87037037	10,37472139	0,714455486

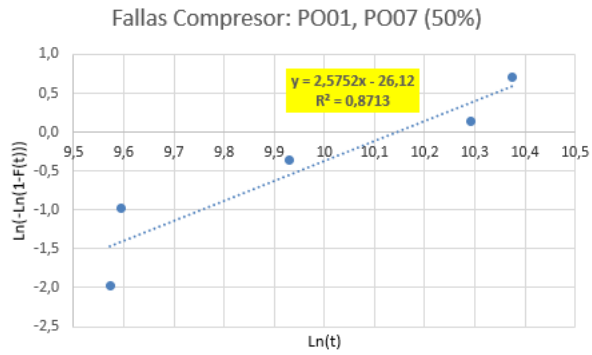

Figura 6.29: Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

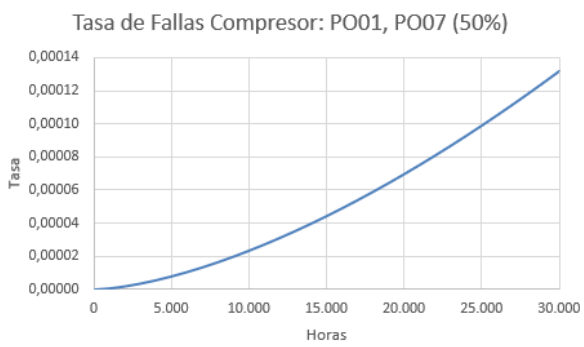

Figura 6.28: Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

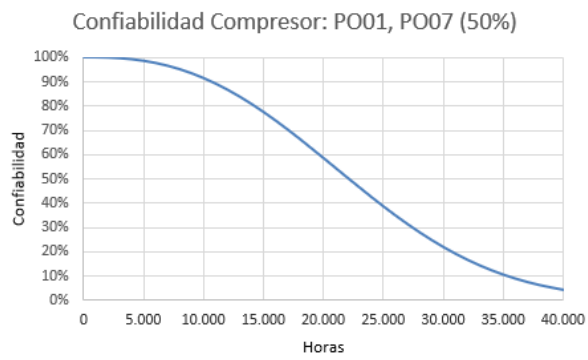

Figura 6.30: Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.28, 6.29, 6.30) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO01 y PO07, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 22.563 horas.

Compresor PO01, PO07 (+/- 30% vida útil)

Tabla 6.11: Fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	14.676,77	0,159090909	9,594021523	-1,752894273
2	20.532,85	0,386363636	9,929781323	-0,716717249
3	29.459,35	0,613636364	10,29076652	-0,050266149
4	32.039,39	0,840909091	10,37472139	0,608830072

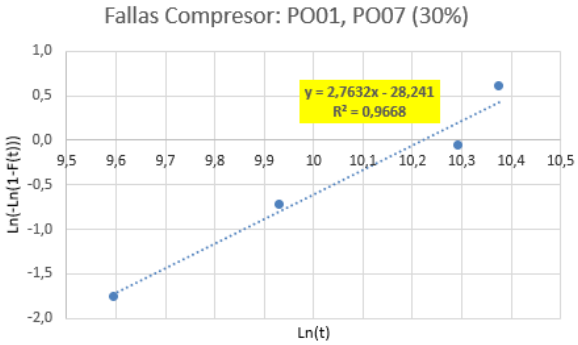

Figura 6.32: Regresión lineal, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

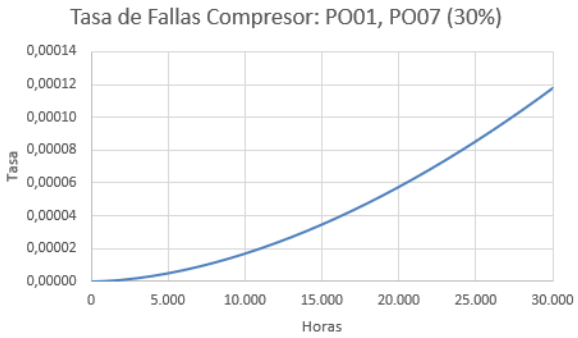

Figura 6.31: Tasa de fallas en compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

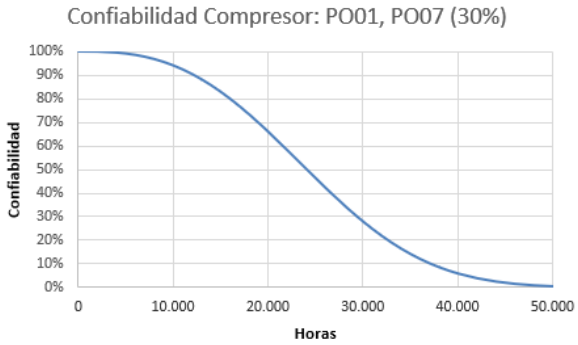

Figura 6.33: Curva de confiabilidad, compresor PO01-PO07 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.31, 6.32, 6.33) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO01 y PO07, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 24.438 horas.

Compresor PO12-PO15-PO19 (total de datos)

Tabla 6.12: Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	4.976,66	0,083333333	8,512514262	-2,4417
2	8.842,90	0,202380952	9,087370168	-1,4867
3	14.262,80	0,321428571	9,565410028	-0,9474
4	14.345,72	0,44047619	9,571206919	-0,5436
5	19.530,48	0,55952381	9,879731601	-0,1986
6	23.483,10	0,678571429	10,06403651	0,1266
7	35.463,83	0,797619048	10,47626849	0,4685
8	43.601,29	0,916666667	10,68284194	0,9102

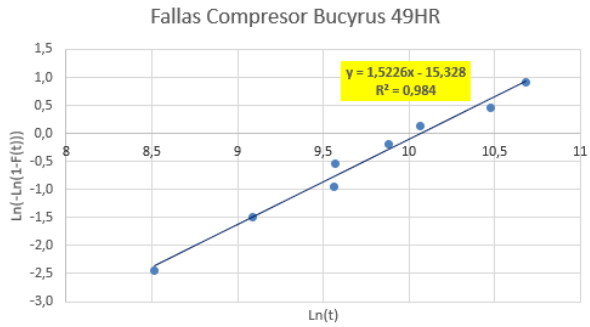

Figura 6.35: Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

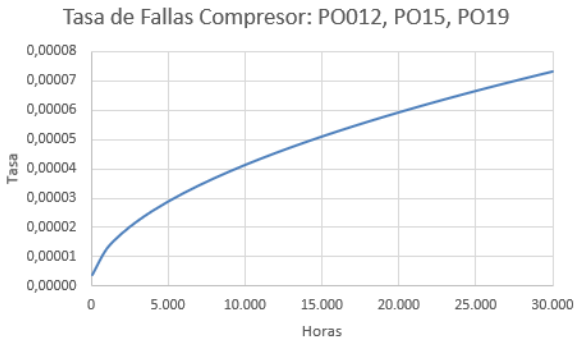

Figura 6.34: Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

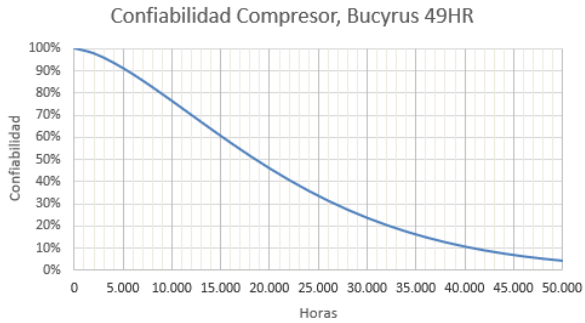

Figura 6.36: Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.34, 6.35, 6.36) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO12, PO15 y PO19.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 21.225 horas.

Compresor PO12-PO15-PO19 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.13: Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.842,90	0,109375	9,087370168	-2,1556
2	14.262,80	0,265625	9,565410028	-1,1753
3	14.345,72	0,421875	9,571206919	-0,6015
4	19.530,48	0,578125	9,879731601	-0,1473
5	23.483,10	0,734375	10,06403651	0,2819
6	35.463,83	0,890625	10,47626849	0,7943

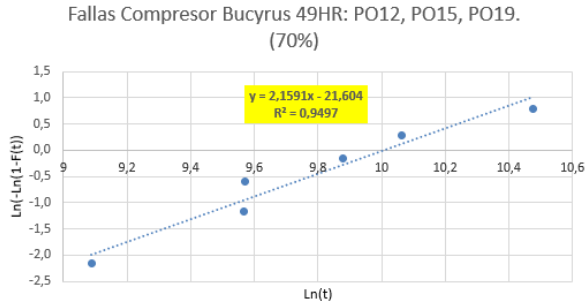

Figura 6.38: Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

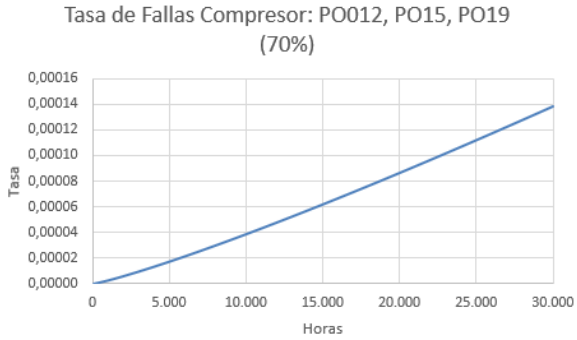

Figura 6.37: Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

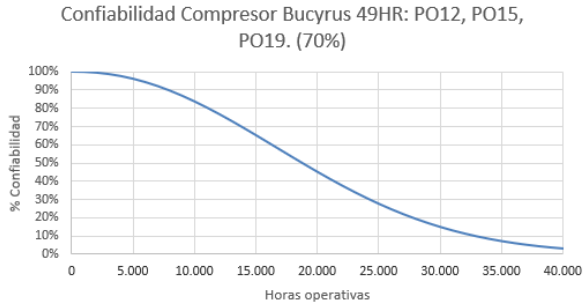

Figura 6.39: Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.37, 6.38, 6.39) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 19.625 horas.

Compresor PO12-PO15-PO19 (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.14: Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	14.262,80	0,12962963	9,56541003	-1,9745
2	14.345,72	0,31481481	9,57120692	-0,9727
3	19.530,48	0,5	9,8797316	-0,3665
4	23.483,10	0,68518519	10,0640365	0,1448
5	35.463,83	0,87037037	10,4762685	0,7145

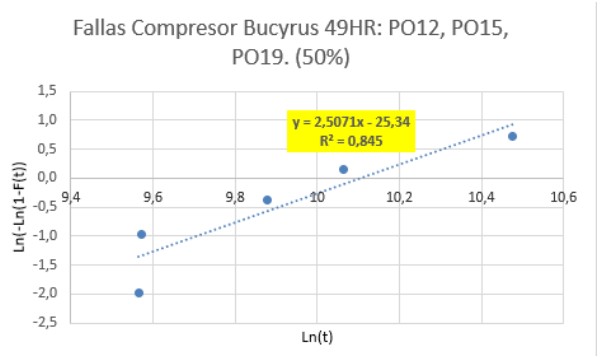

Figura 6.41: Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

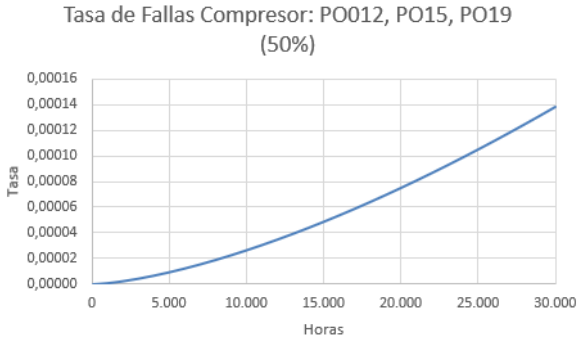

Figura 6.40: Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

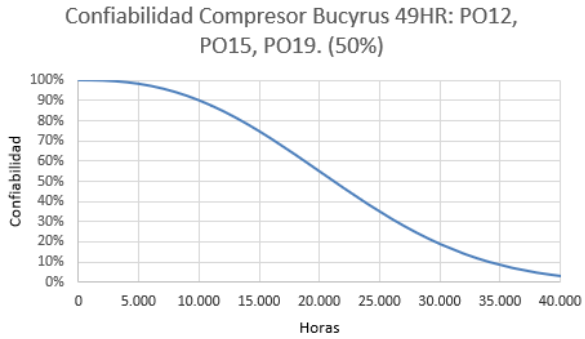

Figura 6.42: Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.40, 6.41, 6.42) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 21.758 horas.

Compresor PO12-PO15-PO19 (+/- 30% vida útil)

Tabla 6.15: Fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	19.530,48	0,29166667	9,8797316	-1,0647
2	23.483,10	0,70833333	10,0640365	0,2088

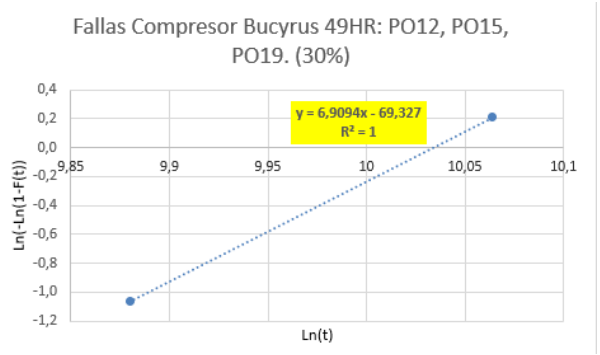

Figura 6.44: Regresión lineal, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

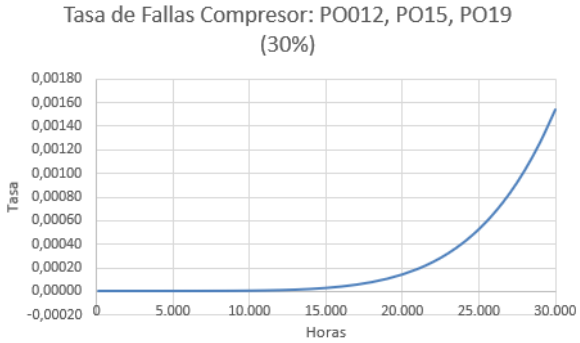

Figura 6.43: Tasa de fallas en compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

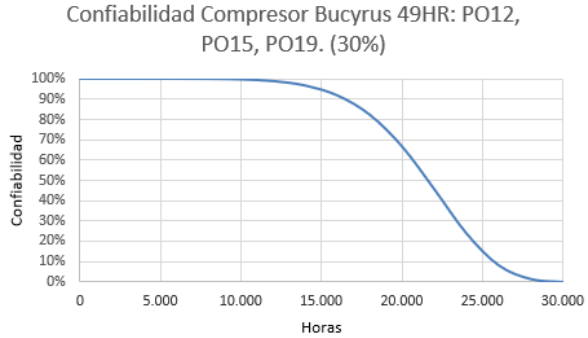

Figura 6.45: Curva de confiabilidad, compresor PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.43, 6.44, 6.45) se presenta el análisis realizado para el compresor de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 21.297 horas.

PTO PO07 (total de datos)

Tabla 6.16: Fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	13.686	0,291666667	9,524092888	-1,064673327
2	41.169	0,708333333	10,62543055	0,208755483

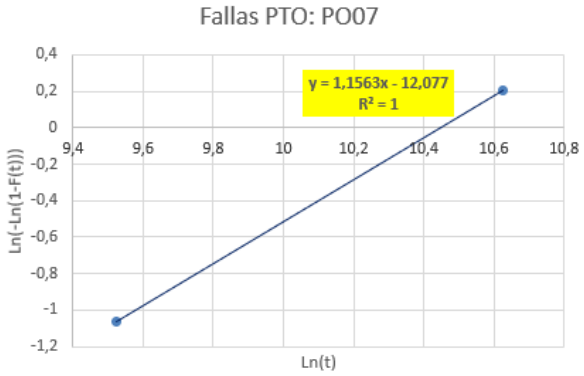

Figura 6.47: Regresión lineal, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

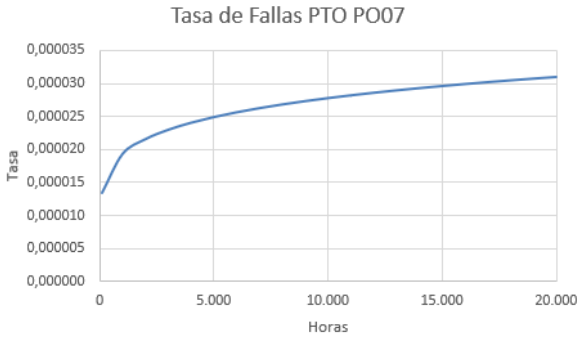

Figura 6.46: Tasa de fallas en PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

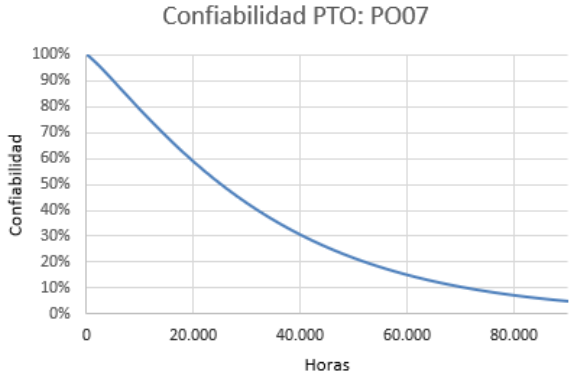

Figura 6.48: Curva de confiabilidad, PTO PO07 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.46, 6.47, 6.48) se presenta el análisis realizado para el PTO del equipo PO07.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 32.645 horas.

PTO P012-PO15-PO19 (total de datos)

Tabla 6.17: Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	281,23	0,048611111	5,63917284	-2,999090431
2	485,67	0,118055556	6,185529381	-2,074444344
3	573,00	0,1875	6,350885717	-1,571952527
4	672,00	0,256944444	6,510258341	-1,214075448
5	1.226,79	0,326388889	7,112156281	-0,928610507
6	2.176,00	0,395833333	7,685243608	-0,685367162
7	4.919,18	0,465277778	8,500897129	-0,468392324
8	6.375,08	0,534722222	8,760151919	-0,267721706
9	9.134,61	0,604166667	9,11982541	-0,076058454
10	9.329,70	0,673611111	9,140958139	0,113030157
11	11.273	0,743055556	9,330208344	0,306672154
12	12.590,57	0,8125	9,440703003	0,515201894
13	13.996	0,881944444	9,546527568	0,75921576
14	16.119,67	0,951388889	9,687795544	1,106548431

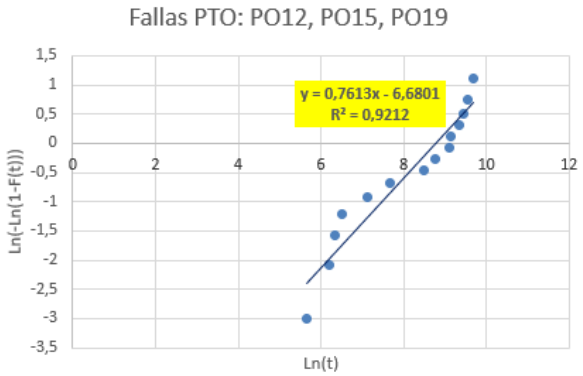

Figura 6.50: Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

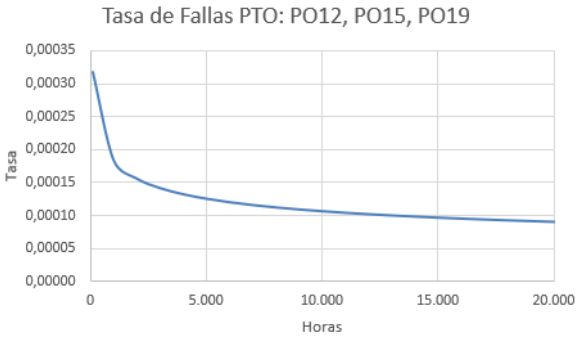

Figura 6.49: Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

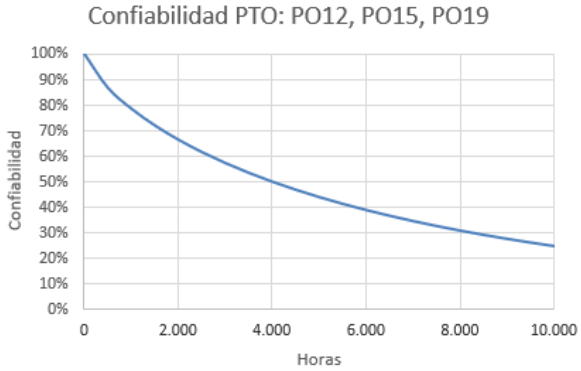

Figura 6.51: Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.49, 6.50, 6.51) se presenta el análisis realizado para el PTO de los equipos PO12, PO15 y PO19.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 7.608 horas.

PTO P012-PO15-PO19 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.18: Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	4.919,18	0,083333333	8,500897129	-2,441716399
2	6.375,08	0,202380952	8,760151919	-1,486670964
3	9.134,61	0,321428571	9,11982541	-0,947354424
4	9.329,70	0,44047619	9,140958139	-0,543574052
5	11.273	0,55952381	9,330208344	-0,198574256
6	12.590,57	0,678571429	9,440703003	0,12661497
7	13.996	0,797619048	9,546527568	0,468504666
8	16.119,67	0,916666667	9,687795544	0,910235093

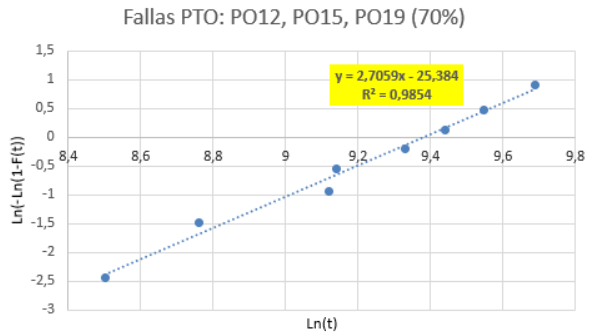

Figura 6.53: Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

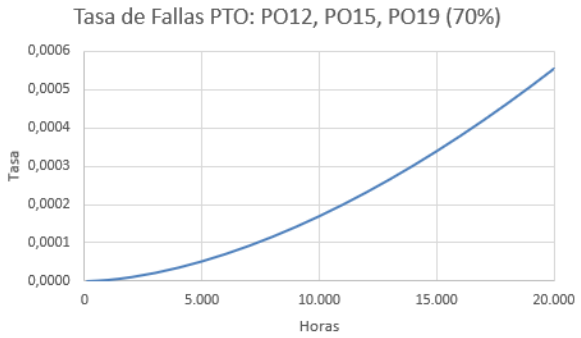

Figura 6.52: Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

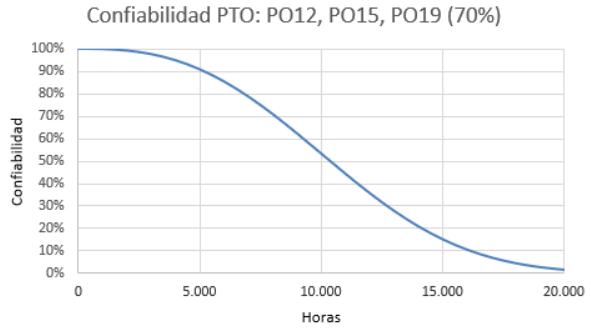

Figura 6.54: Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.52, 6.53, 6.54) se presenta el análisis realizado para el PTO de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.548 horas.

PTO P012-PO15-PO19 (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.19: Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	6.375,08	0,094594595	8,760151919	-2,308880127
2	9.134,61	0,22972973	9,11982541	-1,343181902
3	9.329,70	0,364864865	9,140958139	-0,789839834
4	11.273	0,5	9,330208344	-0,366512921
5	12.590,57	0,635135135	9,440703003	0,00819456
6	13.996	0,77027027	9,546527568	0,385841654
7	16.119,67	0,905405405	9,687795544	0,85787951

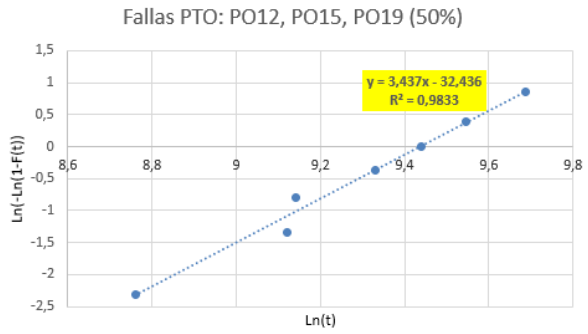

Figura 6.56: Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

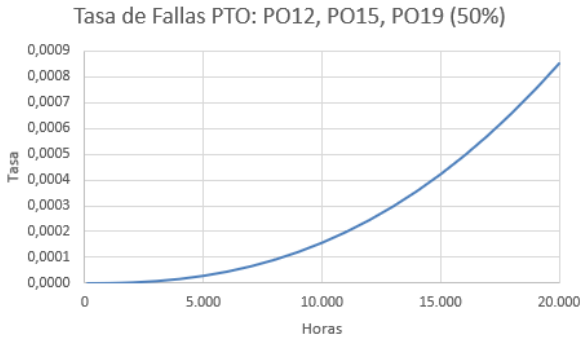

Figura 6.55: Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

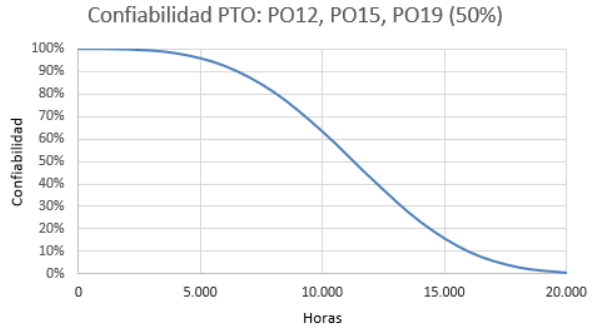

Figura 6.57: Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.55, 6.56, 6.57) se presenta el análisis realizado para el PTO de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.279 horas.

PTO P012-PO15-PO19 (+/- 30% vida útil)

Tabla 6.20: Fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	9.134,61	0,12962963	9,11982541	-1,974458694
2	9.329,70	0,314814815	9,140958139	-0,972686141
3	11.273	0,5	9,330208344	-0,366512921
4	12.590,57	0,685185185	9,440703003	0,144767396
5	13.996	0,87037037	9,546527568	0,714455486

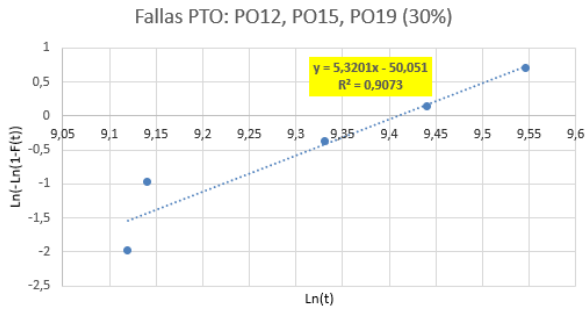

Figura 6.59: Regresión lineal, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

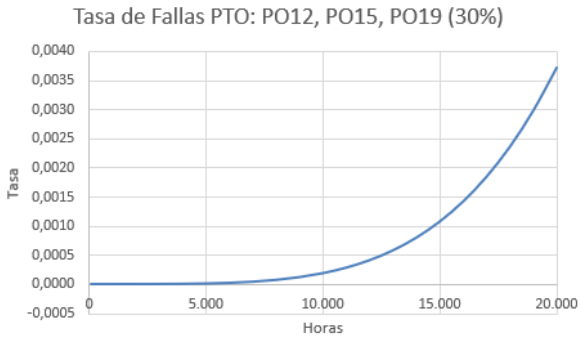

Figura 6.58: Tasa de fallas en PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

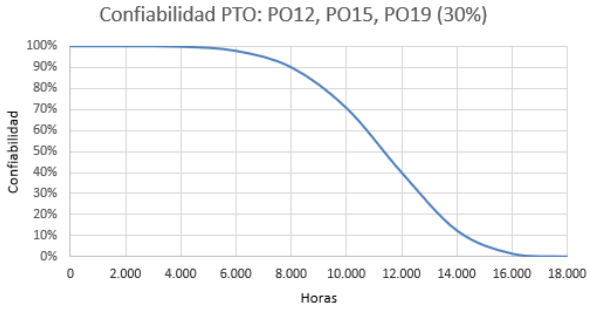

Figura 6.60: Curva de confiabilidad, PTO PO12-PO15-PO19 (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.58, 6.59, 6.60) se presenta el análisis realizado para el PTO de los equipos PO12, PO15 y PO19, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.279 horas.

Epiroc DML

Motor Diesel Epiroc DML (total de datos)

Tabla 6.21: Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	2277,98	0,061403509	7,731044364	-2,758770808
2	2846,26	0,149122807	7,953761131	-1,823327725
3	3006,55	0,236842105	8,008548521	-1,308258602
4	7602,06	0,324561404	8,936174542	-0,935491323
5	7638,21	0,412280702	8,940918562	-0,632041114
6	7783,6	0,5	8,959774235	-0,366512921
7	8881,79	0,587719298	9,091758392	-0,120980941
8	9845,236667	0,675438596	9,19474303	0,11803237
9	12072,08	0,763157895	9,398650627	0,364894181
10	14509,25333	0,850877193	9,582541886	0,643423761
11	15717,81	0,938596491	9,662549743	1,026144924

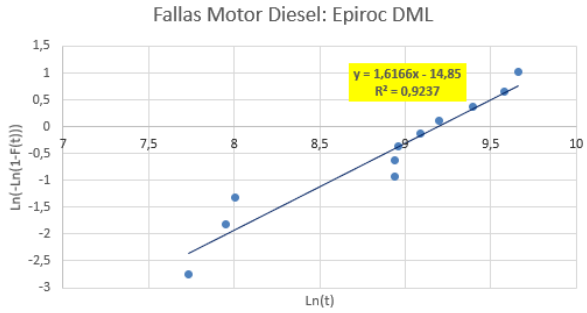

Figura 6.62: Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

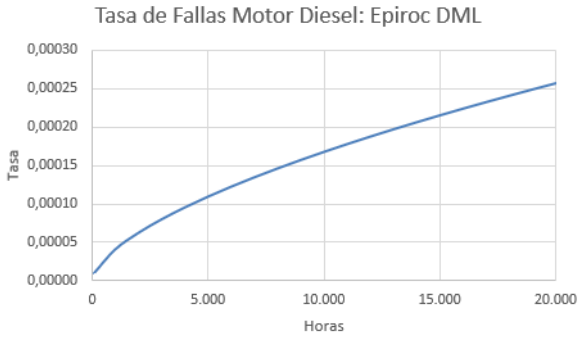

Figura 6.61: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

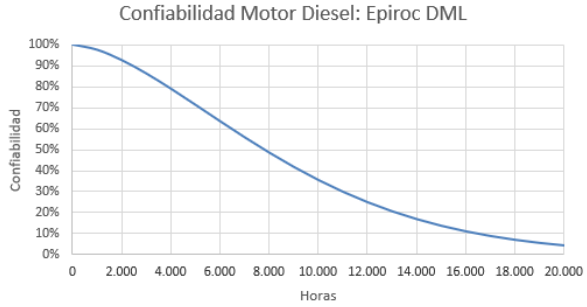

Figura 6.63: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.61, 6.62, 6.63) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc DML.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 8.742 horas.

Motor Diesel Epiroc DML (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.22: Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	7.602,06	0,083333333	8,936174542	-2,441716399
2	7.638,21	0,202380952	8,940918562	-1,486670964
3	7.783,60	0,321428571	8,959774235	-0,947354424
4	8.881,79	0,44047619	9,091758392	-0,543574052
5	9.845,24	0,55952381	9,19474303	-0,198574256
6	12.072,08	0,678571429	9,398650627	0,12661497
7	14.509,25	0,797619048	9,582541886	0,468504666
8	15.717,81	0,916666667	9,662549743	0,910235093

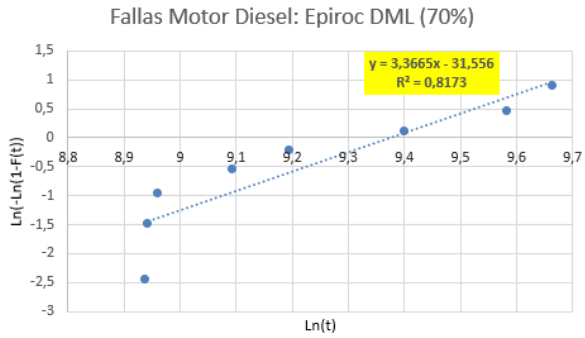

Figura 6.65: Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

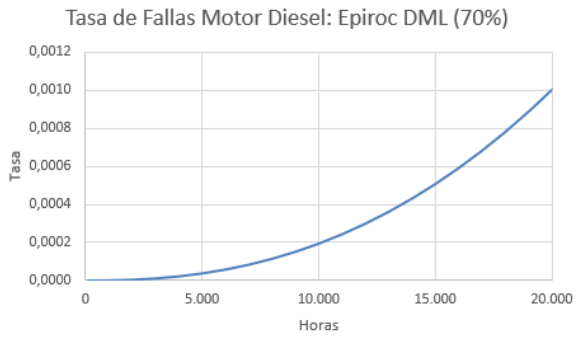

Figura 6.64: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

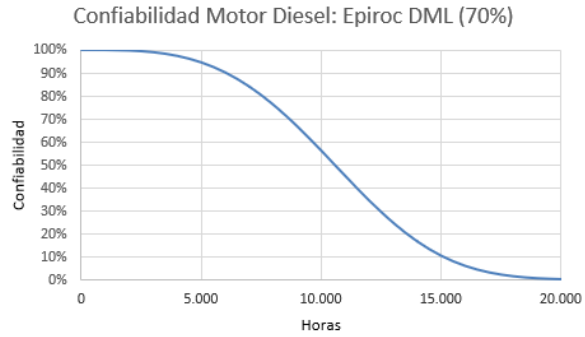

Figura 6.66: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.64, 6.65, 6.66) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc DML, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.571 horas.

Motor Diesel Epiroc DML (+/- 30% vida útil)

Tabla 6.23: Fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.881,79	0,159090909	9,091758392	-1,752894273
2	9.845,24	0,386363636	9,19474303	-0,716717249
3	12.072,08	0,613636364	9,398650627	-0,050266149
4	14.509,25	0,840909091	9,582541886	0,608830072

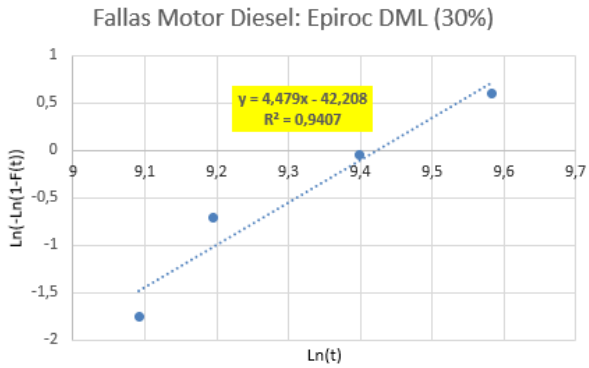

Figura 6.68: Regresión lineal, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

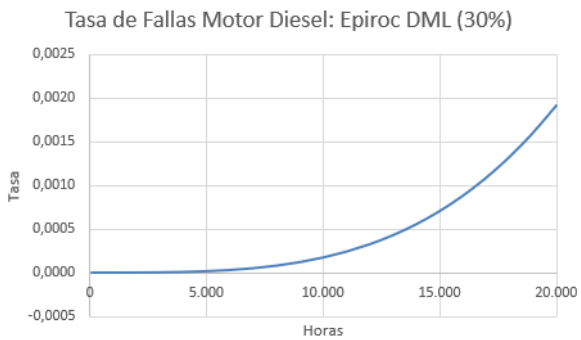

Figura 6.67: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

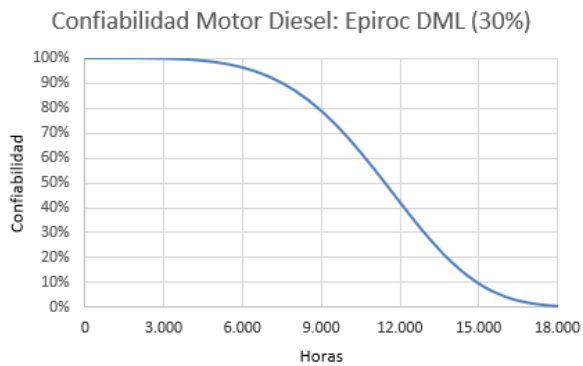

Figura 6.69: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc DML (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.67, 6.68, 6.69) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc DML, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.291 horas.

Cat MD6640

Compresor Cat MD6640 (total de datos)

Tabla 6.24: Fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	15.930,61	0,205882353	9,675997695	-1,467401781
2	16.084,74	0,5	9,685626338	-0,366512921
3	16.828,48	0,794117647	9,730827968	0,457709854

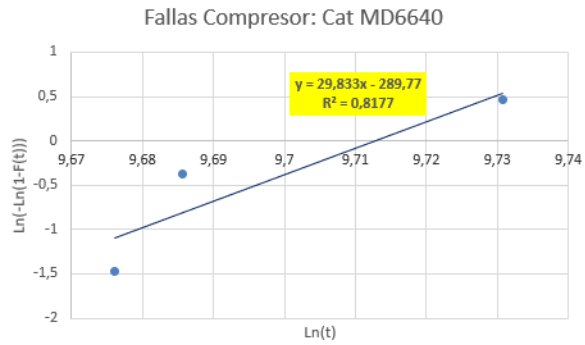

Figura 6.71: Regresión lineal, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

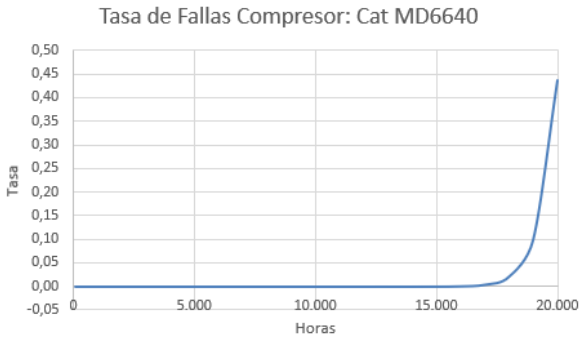

Figura 6.70: Tasa de fallas en compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

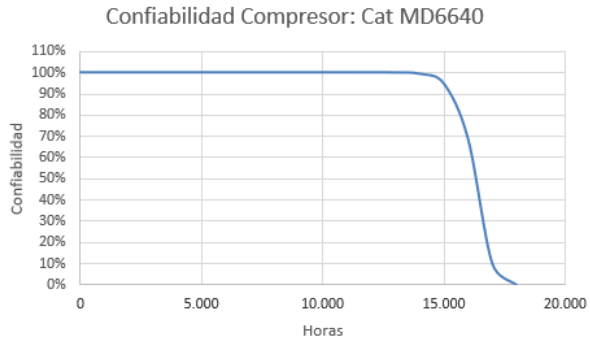

Figura 6.72: Curva de confiabilidad, compresor Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.70, 6.71, 6.72) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Cat MD6640.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 16.230 horas.

PTO Cat MD6640 (total de datos)

Tabla 6.25: Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	2.848,41	0,109375	7,954516223	-2,155616006
2	5.695,29	0,265625	8,647394796	-1,175270415
3	7.386,91	0,421875	8,907464794	-0,601543551
4	7.639,77	0,578125	8,941122777	-0,147287035
5	8.444,97	0,734375	9,041326395	0,281917795
6	16.828,48	0,890625	9,730827968	0,794336831

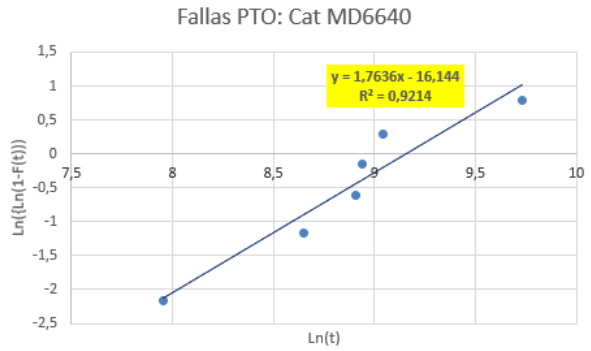

Figura 6.74: Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

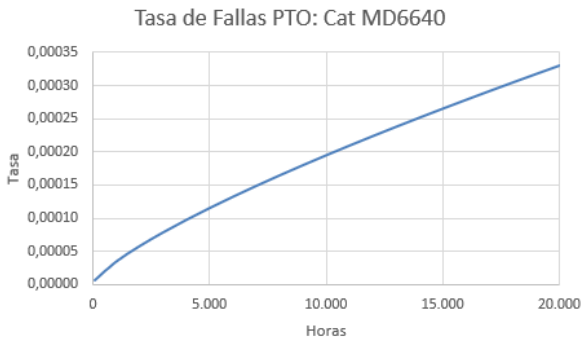

Figura 6.73: Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

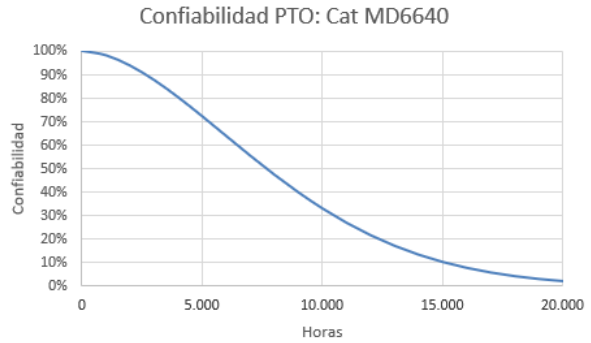

Figura 6.75: Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.73, 6.74, 6.75) se presenta el análisis realizado para el PTO de la flota Cat MD6640.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 8.415 horas.

PTO Cat MD6640 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.26: Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5.695,29	0,12962963	8,647394796	-1,974458694
2	7.386,91	0,314814815	8,907464794	-0,972686141
3	7.639,77	0,5	8,941122777	-0,366512921
4	8.444,97	0,685185185	9,041326395	0,144767396
5	16.828,48	0,87037037	9,730827968	0,714455486

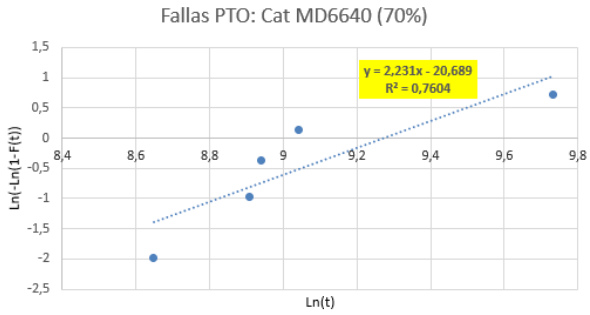

Figura 6.77: Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

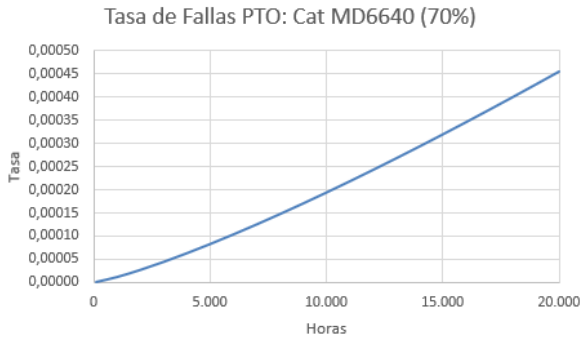

Figura 6.76: Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

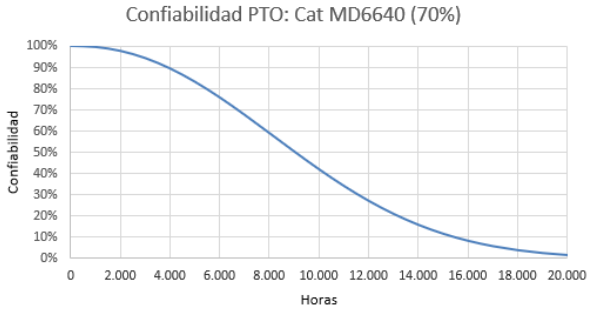

Figura 6.78: Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.76, 6.77, 6.78) se presenta el análisis realizado para el PTO de la flota Cat MD6640, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 9.433 horas.

PTO Cat MD6640 (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.27: Fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	7.386,91	0,159090909	8,907464794	-1,752894273
2	7.639,77	0,386363636	8,941122777	-0,716717249
3	8.444,97	0,613636364	9,041326395	-0,050266149
4	16.828,48	0,840909091	9,730827968	0,608830072

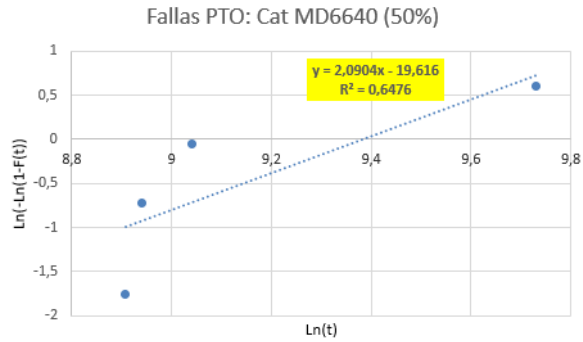

Figura 6.80: Regresión lineal, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

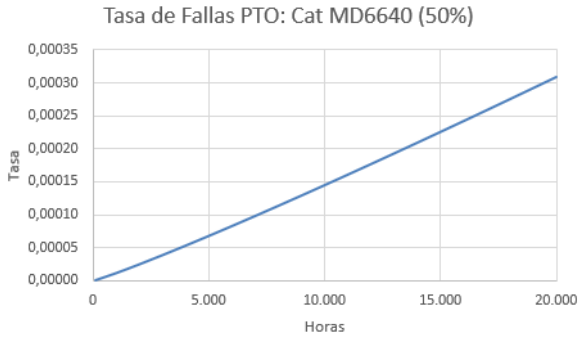

Figura 6.79: Tasa de fallas en PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

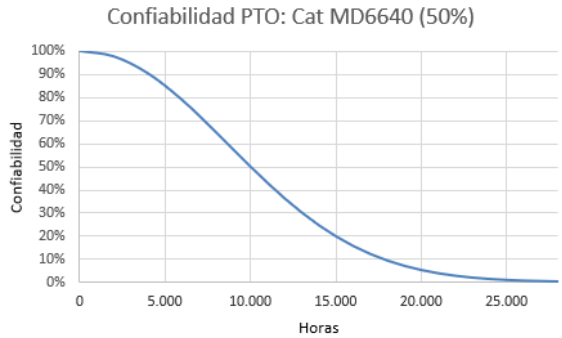

Figura 6.81: Curva de confiabilidad, PTO Cat MD6640 (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.79, 6.80, 6.81) se presenta el análisis realizado para el PTO de la flota Cat MD6640, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.535 horas.

Sandvik D75KS

Cabezal de Rotación Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 6.28: Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.875,78	0,094594595	7,536779852	-2,308880127
2	7.718,32	0,22972973	8,951351951	-1,343181902
3	8.586,14	0,364864865	9,057904554	-0,789839834
4	8.633,31	0,5	9,063383256	-0,366512921
5	10.163,75	0,635135135	9,226582748	0,00819456
6	11610,57367	0,77027027	9,359671485	0,385841654
7	13.956,84	0,905405405	9,54372499	0,85787951

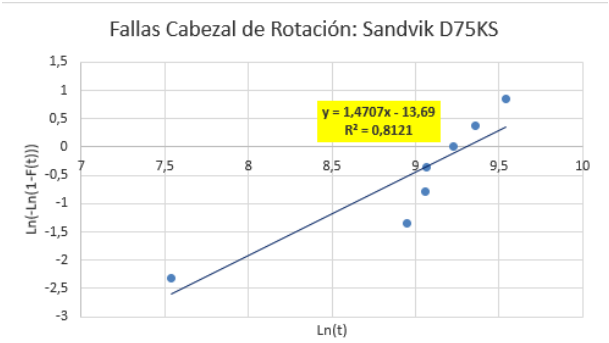

Figura 6.83: Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

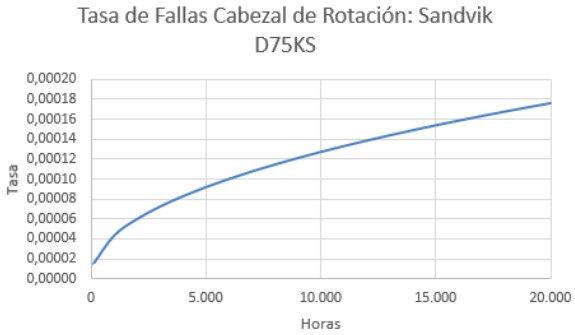

Figura 6.82: Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

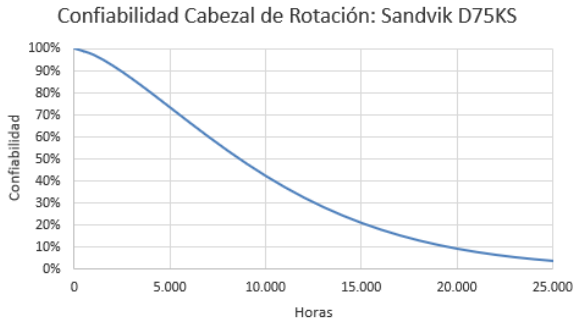

Figura 6.84: Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.82, 6.83, 6.84) se presenta el análisis realizado para el cabezal de rotación de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 9.983 horas.

Cabezal de Rotación Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.29: Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	7.718,32	0,109375	8,951351951	-2,155616006
2	8.586,14	0,265625	9,057904554	-1,175270415
3	8633,31	0,421875	9,063383256	-0,601543551
4	10.163,75	0,578125	9,226582748	-0,147287035
5	11.610,57	0,734375	9,359671485	0,281917795
6	13.956,84	0,890625	9,54372499	0,794336831

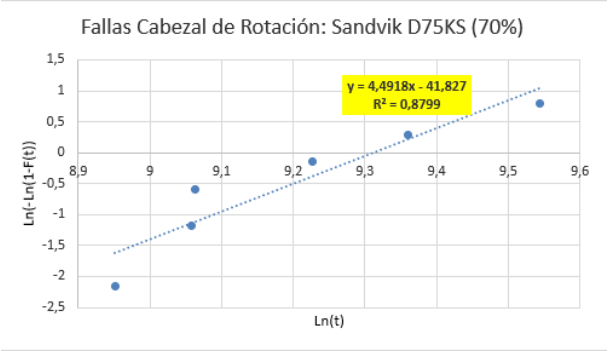

Figura 6.86: Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

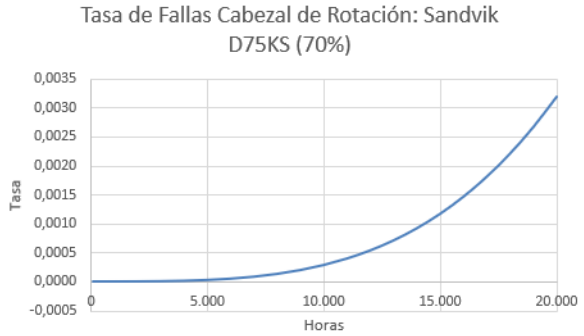

Figura 6.85: Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

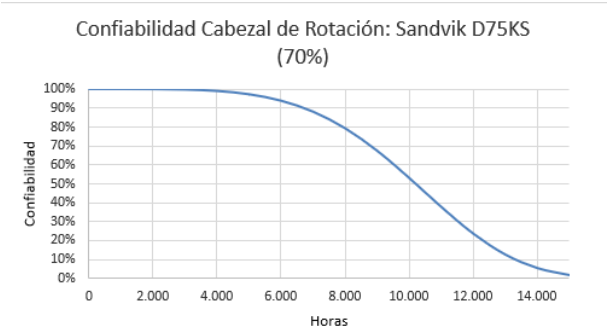

Figura 6.87: Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.85, 6.86, 6.87) se presenta el análisis realizado para el cabezal de rotación de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.100 horas.

Cabezal de Rotación Sandvik D75KS (+/- 30% vida útil)

Tabla 6.30: Fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.586,14	0,109375	9,057904554	-2,155616006
2	8.633,31	0,265625	9,063383256	-1,175270415
3	10.163,75	0,421875	9,226582748	-0,601543551
4	11610,57367	0,578125	9,359671485	-0,147287035
5	13.956,84	0,734375	9,54372499	0,281917795

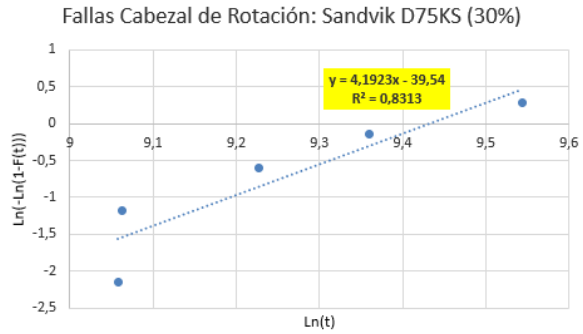

Figura 6.89: Regresión lineal, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

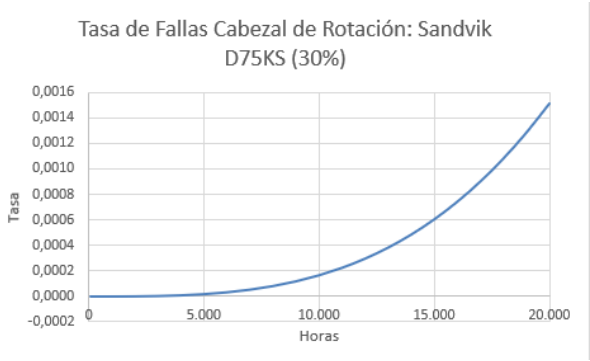

Figura 6.88: Tasa de fallas en cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

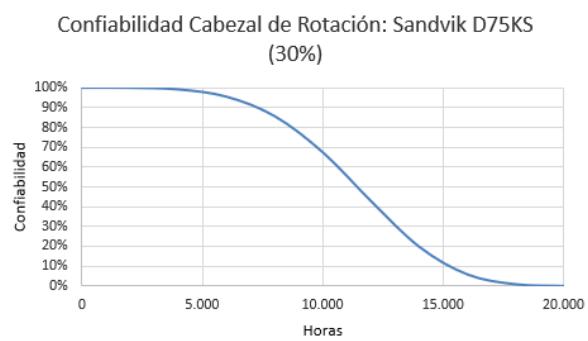

Figura 6.90: Curva de confiabilidad, cabezal de rotación Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.88, 6.89, 6.90) se presenta el análisis realizado para el cabezal de rotación de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 30% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.339 horas.

Compresor Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 6.31: Fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.633,31	0,205882353	9,063383256	-1,467401781
2	27.915,03	0,5	10,23692065	-0,366512921
3	46.499,75	0,794117647	10,74720214	0,457709854

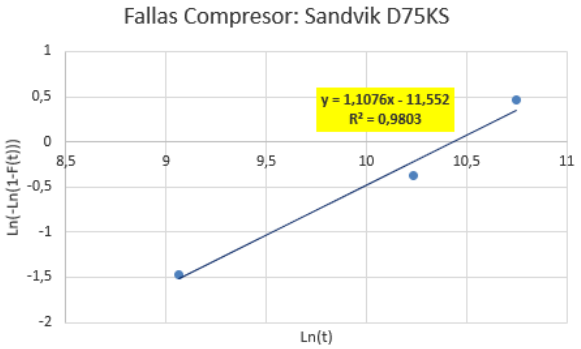

Figura 6.92: Regresión lineal, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

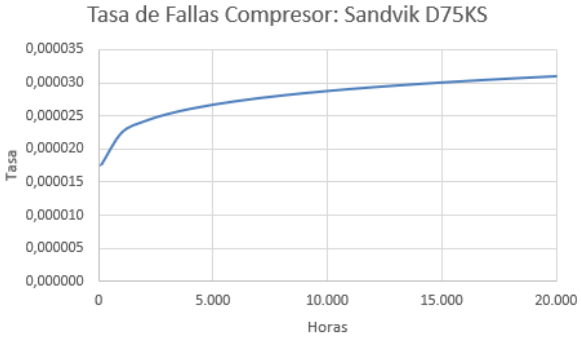

Figura 6.91: Tasa de fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

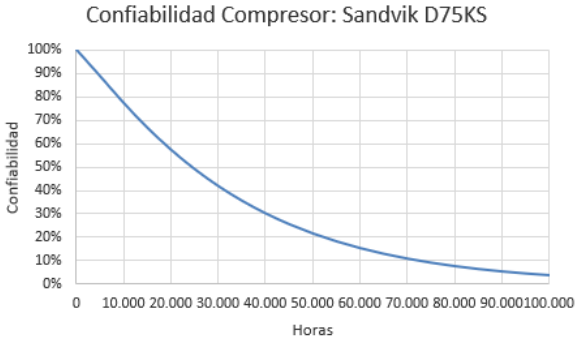

Figura 6.93: Curva de confiabilidad, compresor Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.91, 6.92, 6.93) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 32.591 horas.

Compresor Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.32: Fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.633,31	0,291666667	9,063383256	-1,064673327
2	27.915,03	0,708333333	10,23692065	0,208755483

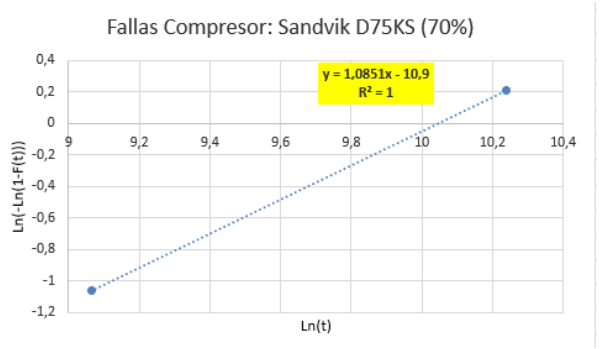

Figura 6.95: Regresión lineal, compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

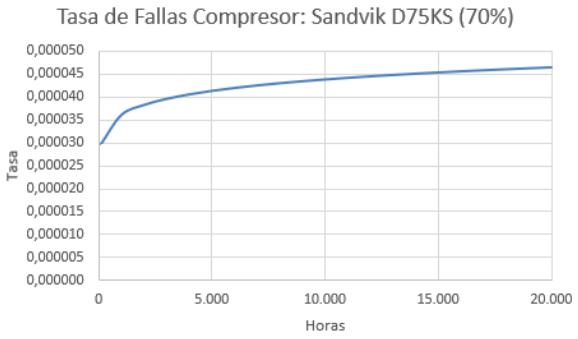

Figura 6.94: Tasa de fallas en compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

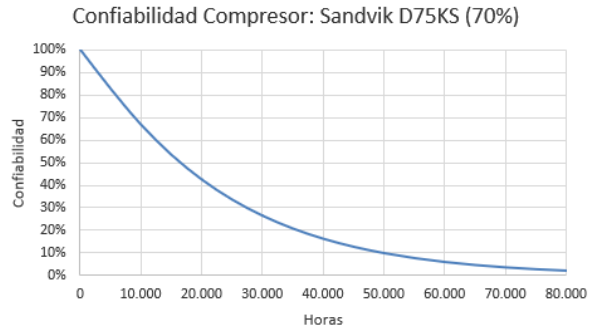

Figura 6.96: Curva de confiabilidad, compresor Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.94, 6.95, 6.96) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 22.337 horas.

Motor Diesel Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 6.33: Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	3.510,97	0,094594595	8,163647632	-2,308880127
2	7.352,84	0,22972973	8,902841912	-1,343181902
3	8.633,31	0,364864865	9,063383256	-0,789839834
4	9.439,86	0,5	9,152696429	-0,366512921
5	12.494,56	0,635135135	9,433048597	0,00819456
6	15.420,47	0,77027027	9,643451364	0,385841654
7	26.196,08	0,905405405	10,17336494	0,85787951

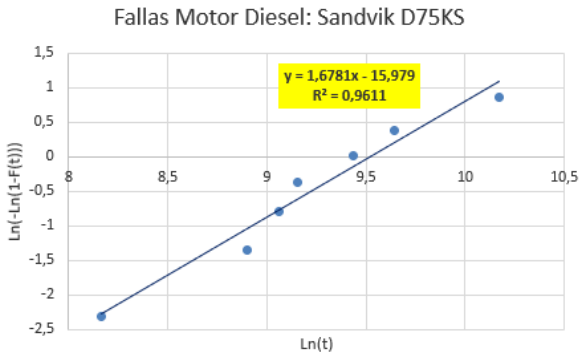

Figura 6.98: Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

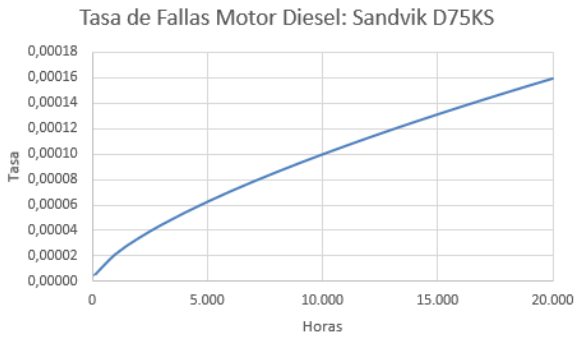

Figura 6.97: Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

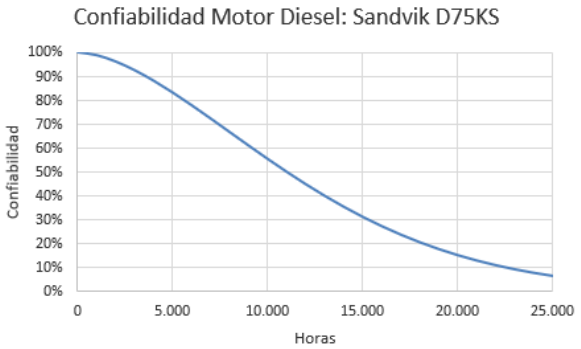

Figura 6.99: Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.97, 6.98, 6.99) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 12.197 horas.

Motor Diesel Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.34: Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	7.352,84	0,12962963	8,902841912	-1,974458694
2	8.633,31	0,314814815	9,063383256	-0,972686141
3	9.439,86	0,5	9,152696429	-0,366512921
4	12.494,56	0,685185185	9,433048597	0,144767396
5	15.420,47	0,87037037	9,643451364	0,714455486

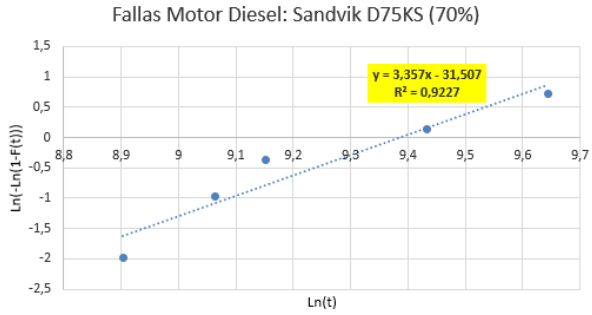

Figura 6.101: Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

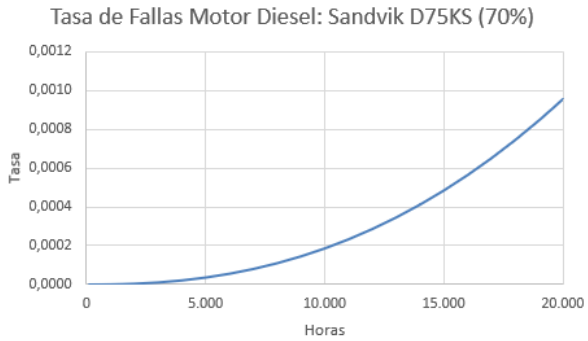

Figura 6.100: Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

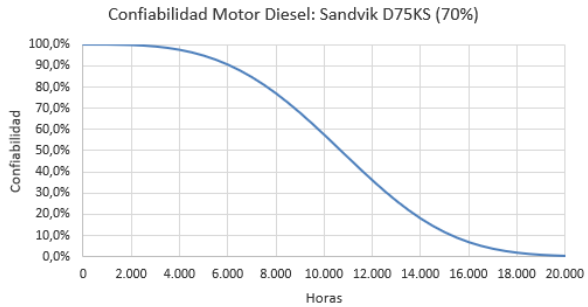

Figura 6.102: Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.100, 6.101, 6.102) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.696 horas.

Motor Diesel Sandvik D75KS (+/- 30% vida útil)

Tabla 6.35: Fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.633,31	0,159090909	9,063383256	-1,752894273
2	9.439,86	0,386363636	9,152696429	-0,716717249
3	12.494,56	0,613636364	9,433048597	-0,050266149
4	15.420,47	0,840909091	9,643451364	0,608830072

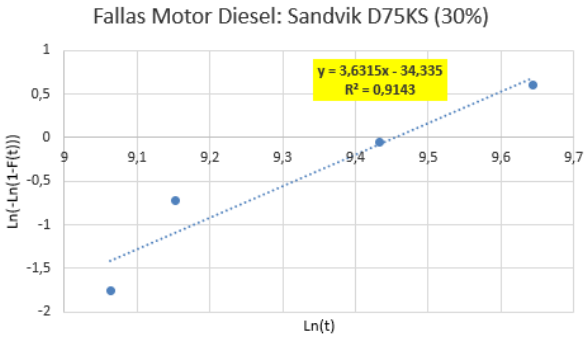

Figura 6.104: Regresión lineal, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

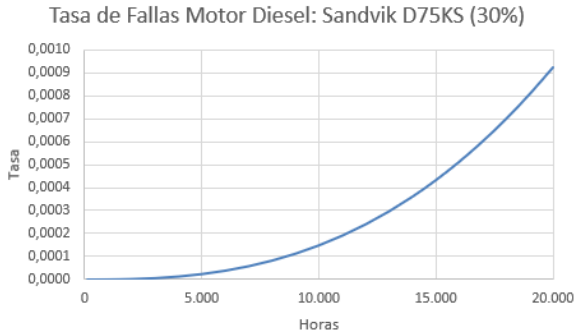

Figura 6.103: Tasa de fallas en motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

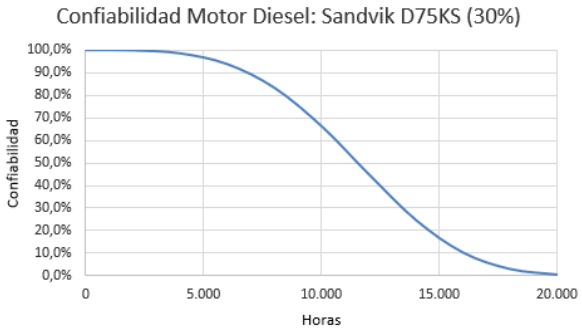

Figura 6.105: Curva de confiabilidad, motor diesel Sandvik D75KS (filtro: +/- 30% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.103, 6.104, 6.105) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.512 horas.

PTO 3 Holes Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 6.36: Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	9,20	0,056451613	2,219203484	-2,845458285
2	913,78	0,137096774	6,817589842	-1,914247621
3	2.142,27	0,217741935	7,669621293	-1,404170849
4	3.058,26	0,298387097	8,025601406	-1,037403987
5	3.098,00	0,379032258	8,038512021	-0,741337623
6	3.578,40	0,459677419	8,182671052	-0,485175833
7	5.016,27	0,540322581	8,520441909	-0,252018579
8	5.581,90	0,620967742	8,627284499	-0,03032111
9	5.981,45	0,701612903	8,696418292	0,190094315
10	8.658,95	0,782258065	9,066348747	0,421630212
11	12.352,29	0,862903226	9,421596718	0,686660297
12	23.127,87	0,943548387	10,04879365	1,055834013

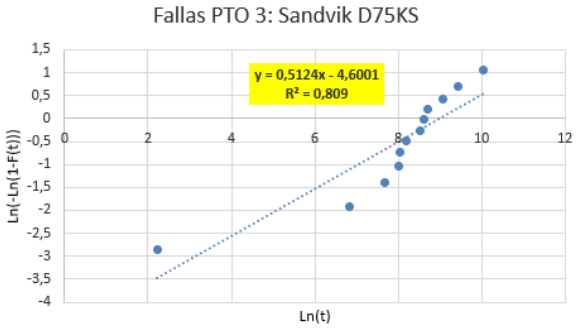

Figura 6.107: Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

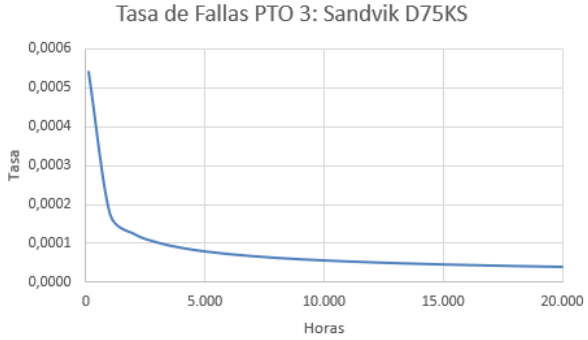

Figura 6.106: Tasa de fallas en PTO 3 holes, Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

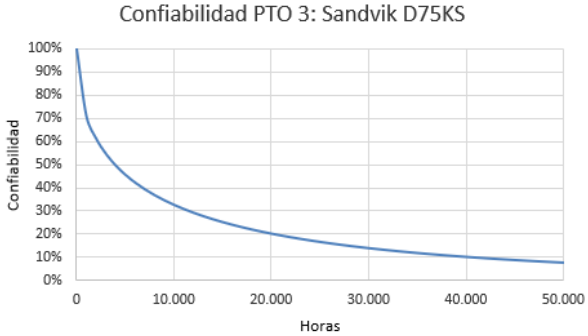

Figura 6.108: Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.106, 6.107, 6.108) se presenta el análisis realizado para el PTO 3 holes de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 15.340 horas.

PTO 3 Holes Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.37: Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5.016,27	0,12962963	8,520441909	-1,974458694
2	5.581,90	0,314814815	8,627284499	-0,972686141
3	5.981,45	0,5	8,696418292	-0,366512921
4	8.658,95	0,685185185	9,066348747	0,144767396
5	12.352,29	0,87037037	9,421596718	0,714455486

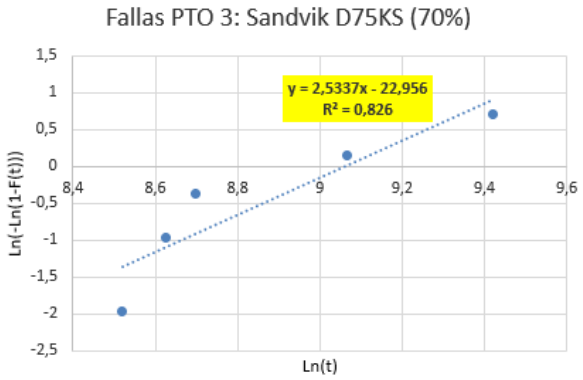

Figura 6.110: Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

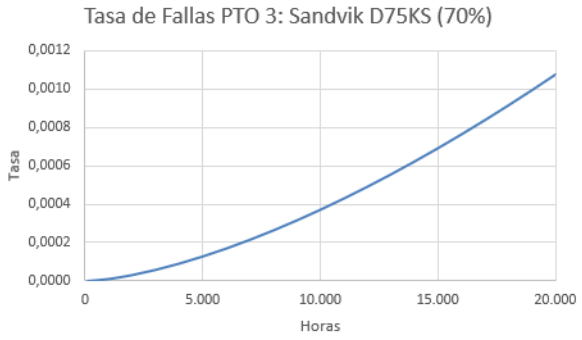

Figura 6.109: Tasa de fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

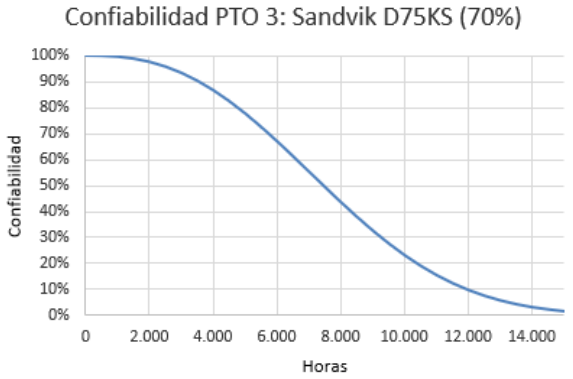

Figura 6.111: Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.109, 6.110, 6.111) se presenta el análisis realizado para el PTO 3 holes de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 7.639 horas.

PTO 3 Holes Sandvik D75KS (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.38: Fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	8.658,95	0,291666667	9,066348747	-1,0646733
2	12.352,29	0,708333333	9,421596718	0,20875548

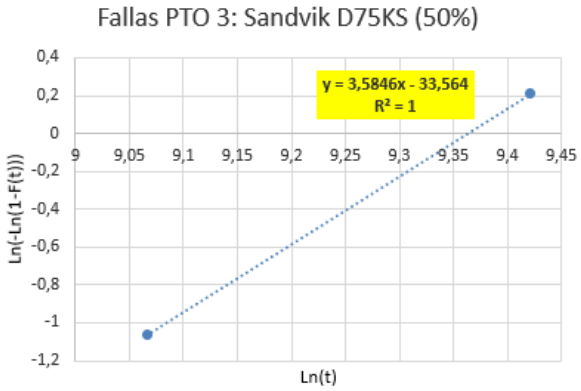

Figura 6.113: Regresión lineal, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

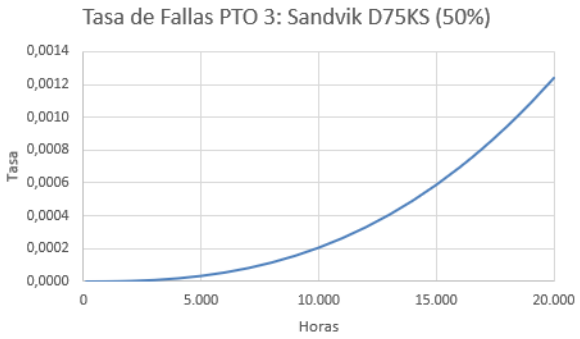

Figura 6.112: Tasa de fallas en PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

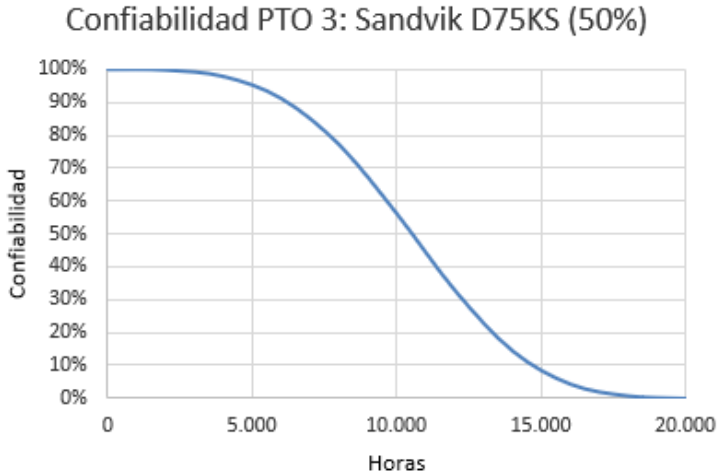

Figura 6.114: Curva de confiabilidad, PTO 3 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.112, 6.113, 6.114) se presenta el análisis realizado para el PTO 3 holes de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 10.499 horas.

PTO 4 Holes Sandvik D75KS (total de datos)

Tabla 6.39: Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t)))]
1	2.142,27	0,094594595	7,669621293	-2,308880127
2	2.889,01	0,22972973	7,968669162	-1,343181902
3	3.432,38	0,364864865	8,141009177	-0,789839834
4	5.744,30	0,5	8,655963338	-0,366512921
5	12.352,29	0,635135135	9,421596718	0,00819456
6	13.420,47	0,77027027	9,504536705	0,385841654
7	23.823,67	0,905405405	10,0784349	0,85787951

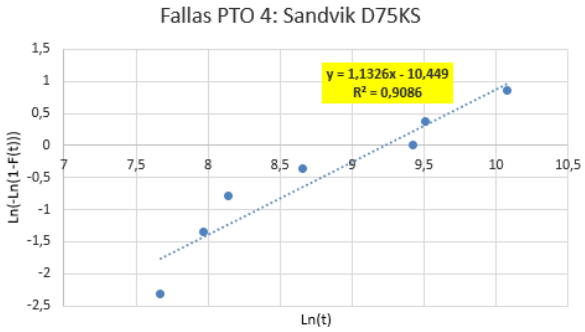

Figura 6.116: Regresión lineal, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

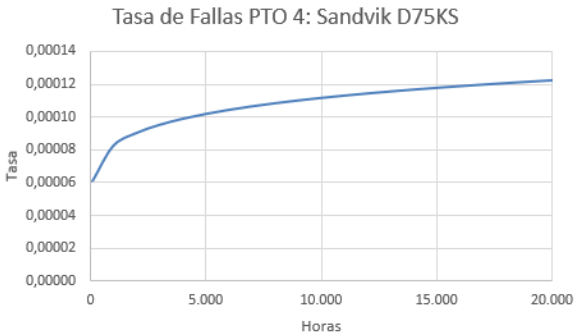

Figura 6.115: Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

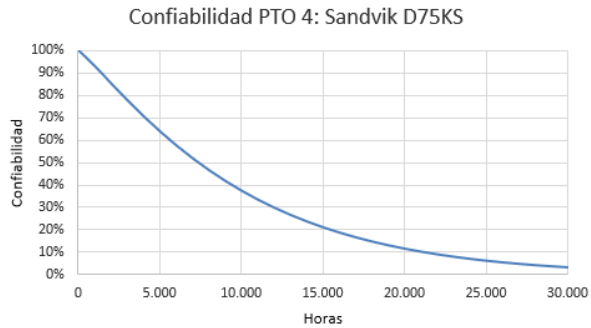

Figura 6.117: Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.115, 6.116, 6.117) se presenta el análisis realizado para el PTO 4 holes de la flota Sandvik D75KS.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 9.708 horas.

PTO 4 Holes Sandvik D75KS (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.40: Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	5744,3	0,205882353	8,655963338	-1,467401781
2	12352,2896	0,5	9,421596718	-0,366512921
3	13420,47367	0,794117647	9,504536705	0,457709854

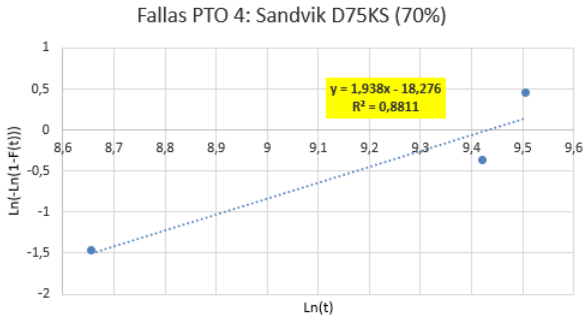

Figura 6.119: Regresión lineal, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

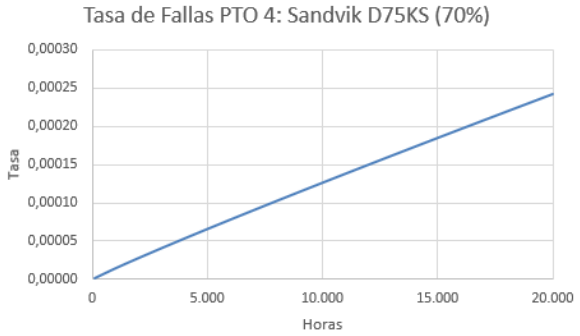

Figura 6.118: Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

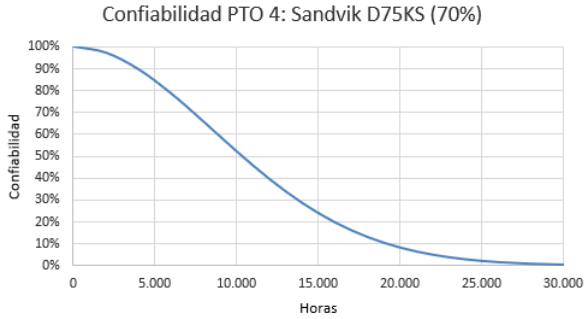

Figura 6.120: Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.118, 6.119, 6.120) se presenta el análisis realizado para el PTO 4 holes de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.051 horas.

PTO 4 Holes Sandvik D75KS (+/- 50% vida útil)

Tabla 6.41: Fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	12352,2896	0,291666667	9,421596718	-1,064673327
2	13420,47367	0,708333333	9,504536705	0,208755483

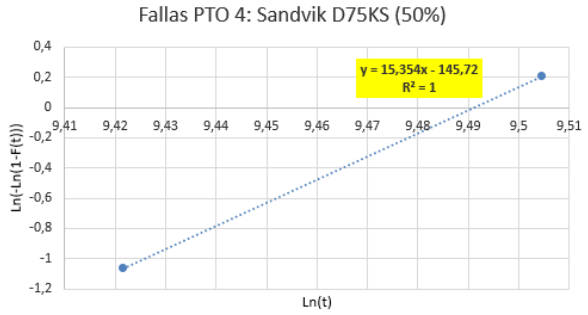

Figura 6.122: Regresión lineal PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

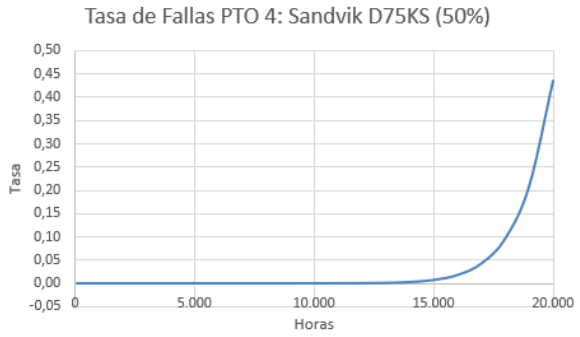

Figura 6.121: Tasa de fallas en PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

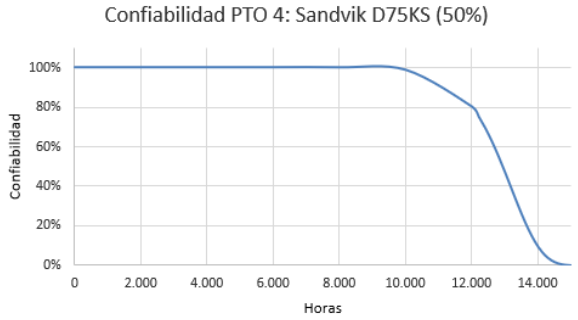

Figura 6.123: Curva de confiabilidad, PTO 4 holes Sandvik D75KS (filtro: +/- 50% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.121, 6.122, 6.123) se presenta el análisis realizado para el PTO 4 holes de la flota Sandvik D75KS, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 50% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 12.791 horas.

Epiroc PV271

Motor Diesel Epiroc PV271 (total de datos)

Tabla 6.42: Fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.263,65	0,2059	7,141759638	-1,467401781
2	4.792,20	0,5	8,474744875	-0,366512921
3	19.570,70	0,7941	9,881788829	0,457709854

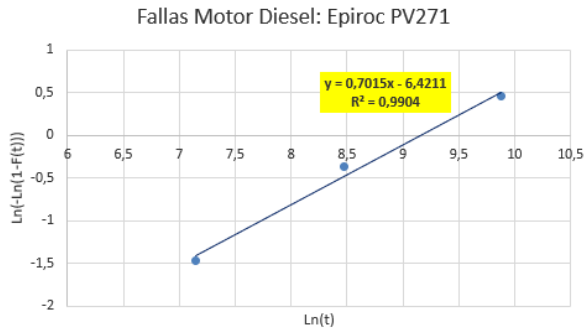

Figura 6.125: Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

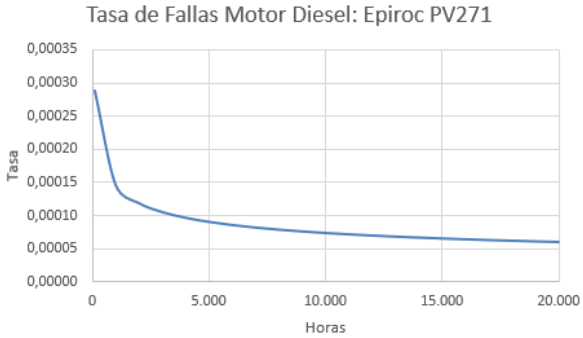

Figura 6.124: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

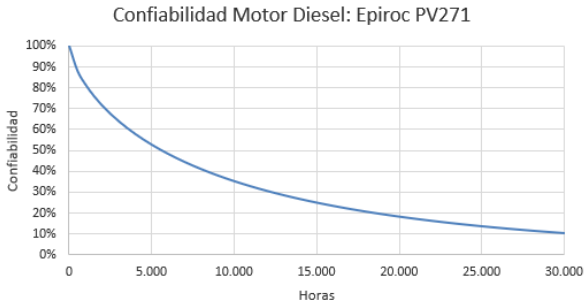

Figura 6.126: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.124, 6.125, 6.126) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc PV271.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 11.933 horas.

Motor Diesel Epiroc PV271 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.43: Fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	4.792,20	0,291666667	8,474744875	-1,064673327
2	19.570,70	0,708333333	9,881788829	0,208755483

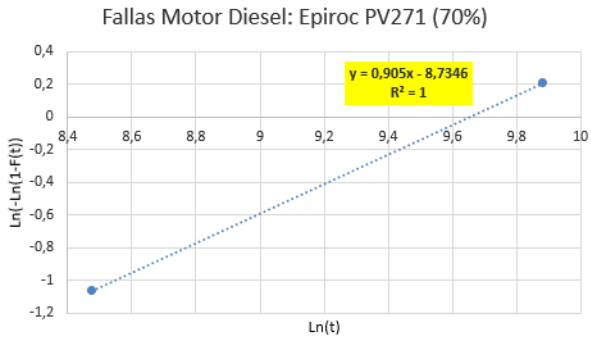

Figura 6.128: Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

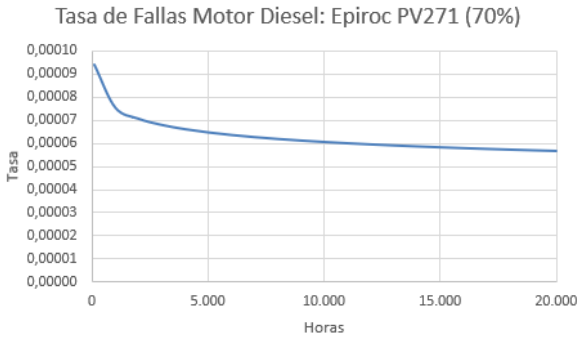

Figura 6.127: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

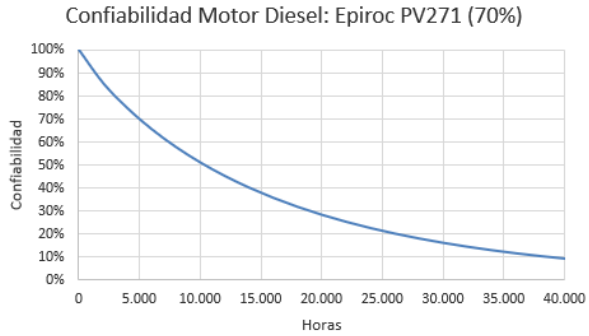

Figura 6.129: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV271 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.124, 6.125, 6.126) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc PV271, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 16.307 horas.

Compresor Epiroc PV271 (total de datos)

Tabla 6.44: Fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	1.263,65	0,2917	7,141759638	-1,064673327
2	34.295,00	0,7083	10,44275485	0,208755483

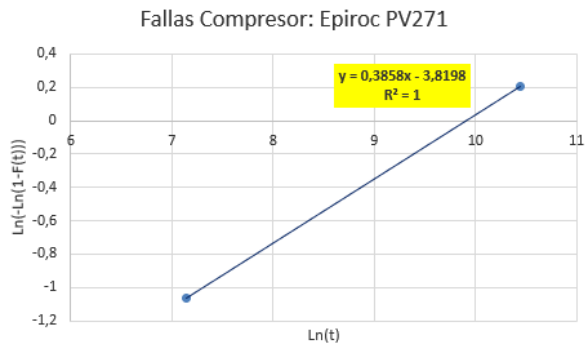

Figura 6.131: Regresión lineal, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

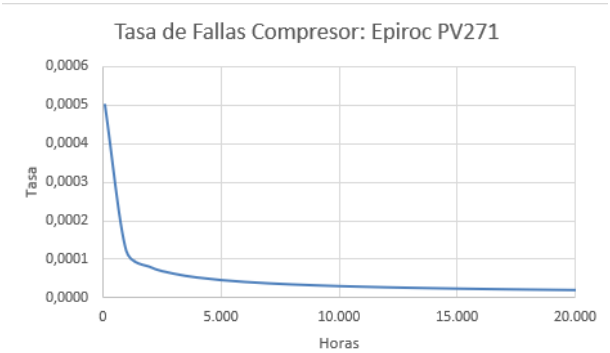

Figura 6.130: Tasa de fallas en compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

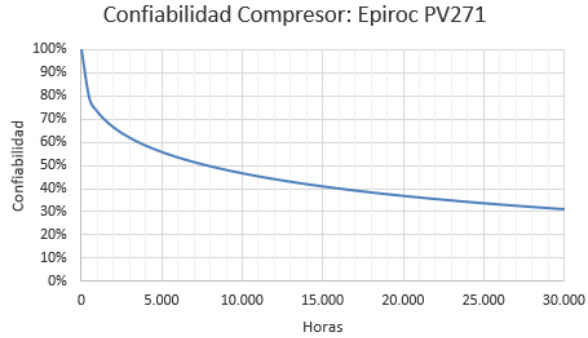

Figura 6.132: Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV271 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.130, 6.131, 6.132) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Epiroc PV271.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 73.486 horas.

Epiroc PV351

Motor Diesel Epiroc PV351 (total de datos)

Tabla 6.45: Fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	3.850,45	0,205882353	8,255945304	-1,467401781
2	15.658,53	0,5	9,658771095	-0,366512921
3	20.792,77	0,794117647	9,942360373	0,457709854

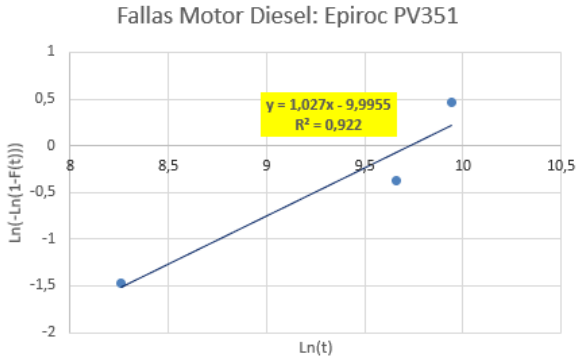

Figura 6.134: Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

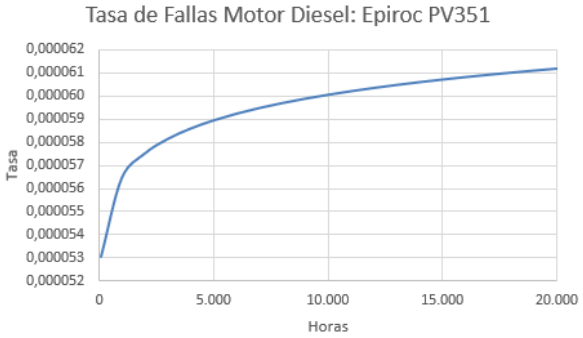

Figura 6.133: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

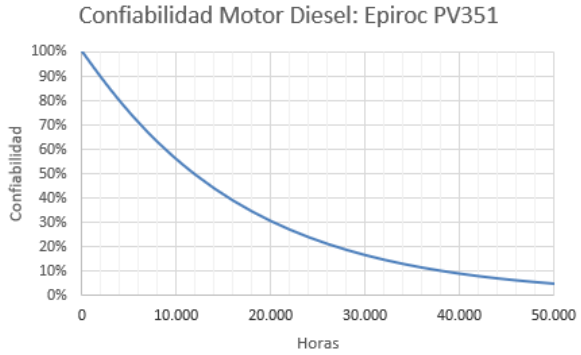

Figura 6.135: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.133, 6.134, 6.135) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc PV351.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 16.678 horas.

Motor Diesel Epiroc PV351 (+/- 70% vida útil)

Tabla 6.46: Fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	3.850,45	0,291666667	8,255945304	-1,064673327
2	15.658,53	0,708333333	9,658771095	0,208755483

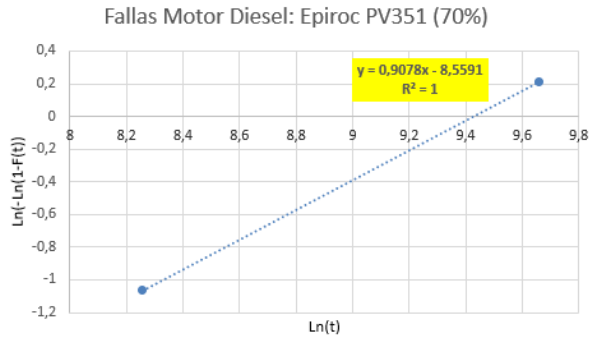

Figura 6.137: Regresión lineal, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

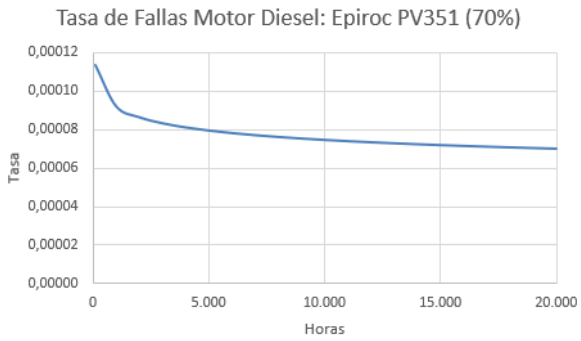

Figura 6.136: Tasa de fallas en motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

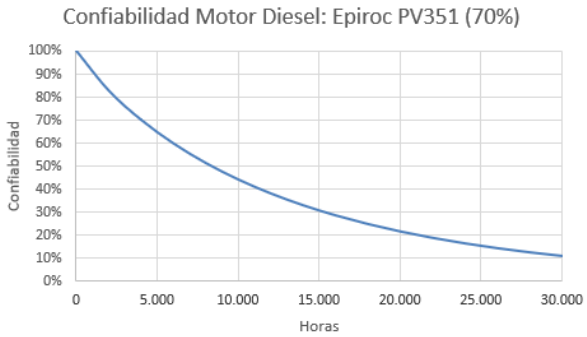

Figura 6.138: Curva de confiabilidad, motor diesel Epiroc PV351 (filtro: +/- 70% vida útil). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.137, 6.137, 6.138) se presenta el análisis realizado para el motor diesel de la flota Epiroc PV351, aplicando un filtro que incluye datos con una desviación del 70% respecto a la vida útil del componente.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 13.025 horas.

Compresor Epiroc PV351 (total de datos)

Tabla 6.47: Fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

	Horas	RM [F(t)]	X [Ln(t)]	Y [Ln(-Ln(1-F(t))]
1	6.931,42	0,291666667	8,843819977	-1,064673327
2	32.914,46	0,708333333	10,40166721	0,208755483

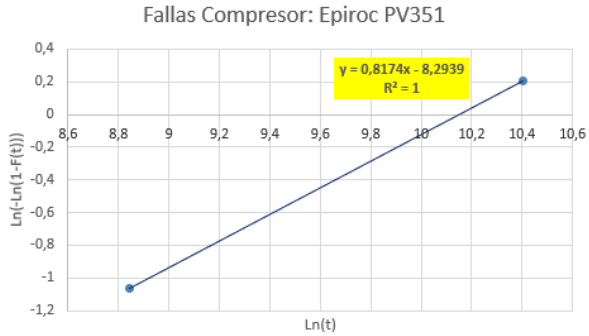

Figura 6.140: Regresión lineal, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

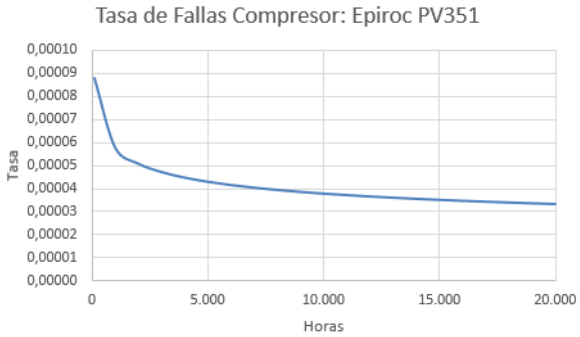

Figura 6.139: Tasa de fallas en compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

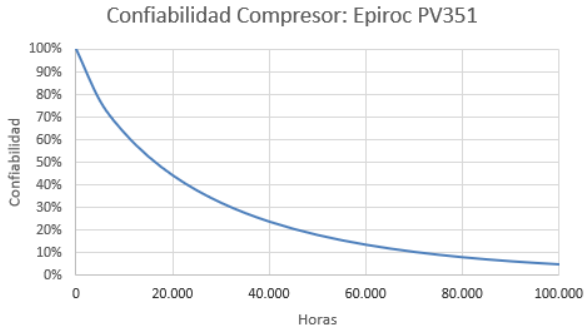

Figura 6.141: Curva de confiabilidad, compresor Epiroc PV351 (filtro: total de datos). (fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores (6.139, 6.140, 6.141) se presenta el análisis realizado para el compresor de la flota Epiroc PV351.

Además, se utilizó la función Gamma con los parámetros de la distribución de Weibull (parámetro de forma y vida característica), obteniendo un MTBF de 28.468 horas.

6.2 Anexo B

En el presente anexo se presentan las tablas de datos con información de mantenciones imprevistas a subsistemas de los sistemas relevantes obtenidos en el capítulo 4, sección 4.1, para cada uno de los equipos obtenidos en el análisis de Pareto de la figura 4.1. Si bien no se presentan los diagramas de Pareto para dichos subsistemas, la información en las tablas se encuentra ordenada de tal manera que resulte sencillo comprender los subsistemas más relevantes en cada caso (en color rojo).

Tabla 6.48: Mantenciones no programadas en subsistemas del compresor, PO12. (fuente: elaboración propia)

Compresor PO12			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Bomba de lubricación	320,22	32,24%	32,24%
Control	239,95	24,16%	56,39%
(en blanco)	167,50	16,86%	73,26%
Espera de repuesto	**164,83**	**16,59%**	**89,85%**
Líneas hidráulicas	52,58	5,29%	95,15%
Filtro tanque separador	24,00	2,42%	97,56%
Sensor presión compresor	14,30	1,44%	99,00%
Líneas neumáticas	5,25	0,53%	99,53%
Bajo nivel de aceite	3,00	0,30%	99,83%
Sensor temperatura aire descarga	1,67	0,17%	100%
TOTAL	**993,30**		

Observación: En la tabla 6.48 se decide no analizar el tercer item "(en blanco)", debido a que esa falta de información no permite realizar análisis al respecto. Por lo tanto se decide analizar el siguiente subsistema relevante (espera de repuesto).

Tabla 6.49: Mantenciones no programadas en subsistemas del motor de inducción, PO12. (fuente: elaboración propia)

Motor de Inducción PO12			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Rodamientos	222,42	86,07%	86,07%
Coneccionado alta 7200	36,00	13,93%	100%
TOTAL	**258,42**		

Tabla 6.50: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO12. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Izado PO12			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Motor eléctrico de izado	235,50	100,00%	100%
TOTAL	**235,50**		

Equipo PO17

En la figura 4.6 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO17, estos son: motor diesel, cabina y compresor. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.51: Mantenciones no programadas en subsistemas del motor diesel, PO17. (fuente: elaboración propia)

Motor Diésel, PO17			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Espera de repuesto	156,00	44,21%	44,21%
Harness de motor	91,00	25,79%	69,99%
Alternador	30,50	8,64%	78,64%
Sensor de temperatura	21,33	6,05%	84,68%
Ductos admisión de aire	12,00	3,40%	88,08%
Filtros de aire	12,00	3,40%	91,48%
Motor	12,00	3,40%	94,88%
Motor de arranque (6 polos)	12,00	3,40%	98,29%
Harness de comunicación	3,00	0,85%	99,14%
Filtros de aceite	2,17	0,61%	99,75%
Ductos y cañerías de refrigerante	0,63	0,18%	99,93%
Enfriador de refrigerante	0,25	0,07%	100,00%
TOTAL	**352,88**		

Tabla 6.52: Mantenciones no programadas en subsistemas de la cabina, PO17. (fuente: elaboración propia)

Cabina, PO17			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Espera de repuesto	166,00	53,29%	53,29%
Pantalla operación	67,75	21,75%	75,04%
Joystick	33,00	10,59%	85,64%
Cables comunicación PLC	24,00	7,71%	93,34%
Pantalla	12,00	3,85%	97,20%
Asiento	7,50	2,41%	99,60%
Falla de módulos	1,23	0,40%	100,00%
TOTAL	**311,48**		

Tabla 6.53: Mantenciones no programadas en subsistemas del compresor, PO17. (fuente: elaboración propia)

Compresor, PO17			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Espera de repuesto	168,00	60,13%	60,13%
Sensor de temperatura	57,42	20,55%	80,67%
Falla de módulos	28,00	10,02%	90,69%
Líneas hidráulicas	12,00	4,29%	94,99%
Válvula mariposa	12,00	4,29%	99,28%
Ductos admisión de aire	2,00	0,72%	100,00%
TOTAL	**279,42**		

Equipo PO25

En la figura 4.7 se observan 6 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO25, estos son: rodado, sistema de rotación, sistema hidráulico, mástil, cabina y compresor. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.54: Mantenciones no programadas en subsistemas del rodado, PO25. (fuente: elaboración propia)

Rodado, PO25			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Bastidor LC	123,50	63,17%	63,17%
Rueda tensora	72,00	36,83%	100,00%
TOTAL	**195,50**		

Tabla 6.55: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO25. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Rotación, PO25			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Motor eléctrico rotación	164,00	92,13%	92,13%
Caja de rotación	12,00	6,74%	98,88%
Motor hidráulico de rotación	2,00	1,12%	100,00%
TOTAL	**178,00**		

Tabla 6.56: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO25. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Hidráulico, PO25			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Tanque hidráulico	54,25	37,52%	37,52%
4 spool	40,92	28,30%	65,82%
Mangueras	32,42	22,42%	88,24%
Motor enrollacable	12,00	8,30%	96,54%
(en blanco)	5,00	3,46%	100,00%
TOTAL	**144,58**		

Tabla 6.57: Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO25. (fuente: elaboración propia)

Mástil, PO25			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Estructura portabarra	52,20	42,00%	42,00%
Electroválvulas de activación seguro torre	42,00	33,79%	75,78%
Deskhole	19,20	15,45%	91,23%
(en blanco)	7,17	5,77%	97,00%
Flauta	3,73	3,00%	100,00%
TOTAL	**124,30**		

Tabla 6.58: Mantenciones no programadas en subsistemas de la cabina, PO25. (fuente: elaboración propia)

Cabina, PO25			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Fuente poder pantalla	72,00	59,59%	59,59%
Espera de repuesto	36,00	29,79%	89,38%
(en blanco)	12,00	9,93%	99,31%
Pantalla operación	0,83	0,69%	100,00%
TOTAL	**120,83**		

Tabla 6.59: Mantenciones no programadas en subsistemas del compresor, PO25. (fuente: elaboración propia)

Compresor, PO25			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Lineas hidráulicas	54,67	54,79%	54,79%
Control	28,68	28,75%	83,54%
Sensor de temperatura	13,00	13,03%	96,58%
(en blanco)	2,33	2,34%	98,91%
Electroválvula recirculación	1,08	1,09%	100,00%
TOTAL	**99,77**		

Equipo PO21

En la figura 4.8 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO21, estos son: sistema de izado, motor diesel y mástil. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.60: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO21. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Izado, PO21			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Rack piñón	434,33	95,72%	95,72%
(en blanco)	16,00	3,53%	99,25%
Carro de izado	1,75	0,39%	99,63%
Freno de izado	1,67	0,37%	100,00%
TOTAL	**453,75**		

Tabla 6.61: Mantenciones no programadas en subsistemas del motor diesel, PO21. (fuente: elaboración propia)

Motor Diésel, PO21			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Espera de repuesto	144,00	75,62%	75,62%
Bajo nivel de aceite	21,17	11,12%	86,73%
Cajas ciclónicas	12,00	6,30%	93,03%
Motor de arranque (6 polos)	7,00	3,68%	96,71%
Enfriador de refrigerante	5,25	2,76%	99,47%
(en blanco)	1,02	0,53%	100,00%
TOTAL	**190,43**		

Tabla 6.62: Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO21. (fuente: elaboración propia)

Mástil, PO21			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Estructura portabarra	25,58	17,97%	17,97%
Llave caymán	20,83	14,63%	32,60%
Porta barras	20,08	14,10%	46,70%
Encoder	12,00	8,43%	55,13%
Llave de corte	12,00	8,43%	63,55%
(en blanco)	12,00	8,43%	71,98%
Deskhole	10,00	7,02%	79,00%
Cremallera	9,00	6,32%	85,32%
Soporte de barra	7,33	5,15%	90,47%
Electroválvulas de luneta	5,83	4,10%	94,57%
Huinche	3,83	2,69%	97,26%
Cilindro llave de corte	1,97	1,38%	98,64%
Cilindros de avance	1,33	0,94%	99,58%
Cilindro levante pluma	0,60	0,42%	100,00%
TOTAL	**142,40**		

Observación: Se decide dejar fuera de análisis el item "(en blanco)" debido a que esta falta de información no permite análisis. Por lo tanto se ingresa como subsistema relevante a analizar el item "cremallera".

Equipo PO13

En la figura 4.9 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO13, estos son: sistema de rotación, mástil y PTO. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.63: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO13. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Rotación, PO13			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Caja de rotación	171,48	53,36%	53,36%
Motor hidráulico de rotación	108,38	33,73%	87,09%
Espera de repuesto	24,00	7,47%	94,55%
Motor eléctrico de rotación	12,00	3,73%	98,29%
Mangueras hidráulicas	3,00	0,93%	99,22%
(en blanco)	2,50	0,78%	100,00%
TOTAL	**321,37**		

Tabla 6.64: Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO13. (fuente: elaboración propia)

Mástil, PO13			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Cadenas de izado	151,25	58,12%	58,12%
Llave caymán	36,00	13,83%	71,96%
(en blanco)	34,50	13,26%	85,22%
Llave de corte	13,00	5,00%	90,21%
Cilindro soporte de barra	12,00	4,61%	94,82%
Soporte de barra	12,00	4,61%	99,44%
Cremallera	0,75	0,29%	99,72%
Switch de posicionamiento vertical	0,72	0,28%	100,00%
TOTAL	**260,22**		

Tabla 6.65: Mantenciones no programadas en subsistemas del PTO, PO13. (fuente: elaboración propia)

PTO, PO13			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Bajo nivel	77,25	57,12%	57,12%
Bomba propel LNC	58,00	42,88%	100,00%
TOTAL	**135,25**		

Equipo PO16

En la figura 4.5 se observan 4 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO16, estos son: mástil, sistema hidráulico, sistema de izado y sistema de rotación. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.66: Mantenciones no programadas en subsistemas del mástil, PO16. (fuente: elaboración propia)

Mástil, PO16			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Cilindros de avance	170,50	67,48%	67,48%
Cadenas de empuje	24,00	9,50%	76,98%
Llave de corte	24,00	9,50%	86,48%
Porta Barras	19,75	7,82%	94,29%
Mangueras	11,33	4,49%	98,78%
Cadenas de izado	2,08	0,82%	99,60%
Cilindros de llave	1,00	0,40%	100,00%
TOTAL	**252,67**		

Tabla 6.67: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO16. (fuente: elaboración propia)

Sistema Hidráulico, PO16			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Mangueras	85,00	48,97%	48,97%
Válvula tanque hidráulico	49,25	28,37%	77,34%
Bomba propel	31,00	17,86%	95,20%
Electroválvulas activación sistema hidráulico	6,75	3,89%	99,09%
Banco nivelación	1,58	0,91%	100,00%
TOTAL	**173,58**		

Tabla 6.68: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO16. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Izado, PO16			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Motor hidráulico izado	36,00	23,57%	23,57%
(en blanco)	36,00	23,57%	47,14%
Espera de repuesto	24,00	15,71%	62,85%
Electroválvulas activación sistema hidráulico	20,00	13,09%	75,95%
Carro izado	**19,33**	**12,66%**	**88,61%**
Rack piñón	12,00	7,86%	96,46%
Caja de izado	5,40	3,54%	100,00%
TOTAL	**152,73**		

Observación: Se decide dejar fuera de análisis el item "(en blanco)" debido a que esta falta de información no permite análisis. Por lo tanto se ingresa como subsistema relevante a analizar el item "carro de izado".

Tabla 6.69: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO16. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Rotación, PO16			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Caja de rotación	82,75	65,54%	65,54%
Motor hidráulico de rotación	31,50	24,95%	90,50%
Sensor de rotación	12,00	9,50%	100,00%
TOTAL	**126,25**		

Equipo PO18

En la figura 4.11 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO12, estos son: rodado, cabina y sistema hidráulico. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.70: Mantenciones no programadas en subsistemas del rodado, PO18. (fuente: elaboración propia)

Rodado, PO18			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Zapatas y pasadores	136,00	51,00%	51,00%
Bastidor LC	66,00	24,75%	75,75%
Rueda propulsora y pernos	52,67	19,75%	95,50%
Bastidor LNC	12,00	4,50%	100,00%
TOTAL	**266,67**		

Tabla 6.71: Mantenciones no programadas en subsistemas de la cabina, PO18. (fuente: elaboración propia)

Cabina, PO18			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Cables comunicación PLC	190,58	86,01%	86,01%
Pantalla operación	14,33	6,47%	92,48%
Falla de módulos	10,00	4,51%	96,99%
Joystick	4,50	2,03%	99,02%
Pantalla	2,00	0,90%	99,92%
Chapas	0,17	0,08%	100,00%
TOTAL	**221,58**		

Tabla 6.72: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO18. (fuente: elaboración propia)

Sistema Hidráulico, PO18			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Bomba propel	48,00	70,07%	70,07%
Mangueras	20,50	29,93%	100,00%
TOTAL	**68,50**		

Equipo PO20

En la figura 4.12 se observa 1 sistema de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO20, el motor diesel. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.73: Mantenciones no programadas en subsistemas del motor diesel, PO20. (fuente: elaboración propia)

Motor Diésel, PO20			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Espera de repuesto	432,00	81,72%	81,72%
(en blanco)	37,00	7,00%	88,71%
Ductos y cañerías de refrigerante	27,17	5,14%	93,85%
Sensor temperatura refrigerante	12,00	2,27%	96,12%
Harness de motor	11,00	2,08%	98,20%
Alternador	5,33	1,01%	99,21%
Cardán	4,00	0,76%	99,97%
Filtros de Aire	0,17	0,03%	100,00%
TOTAL	**528,67**		

Equipo PO23

En la figura 4.13 se observan 3 sistemas de mayor relevancia en cuanto a cantidad de horas de mantenimiento imprevisto para el equipo PO23, estos son: sistema de izado, sistema de rotación y sistema hidráulico. A continuación se procede a analizar los subsistemas más relevantes en cada uno de los sistemas antes mencionados.

Tabla 6.74: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de izado, PO23. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Izado, PO23			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Motor eléctrico izado	133,57	80,88%	80,88%
Blower de izado	12,00	7,27%	88,14%
Caja de izado	12,00	7,27%	95,41%
Control	7,58	4,59%	100,00%
TOTAL	**165,15**		

Tabla 6.75: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema de rotación, PO23. (fuente: elaboración propia)

Sistema de Rotación, PO23			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
Motor eléctrico de rotación	115,33	74,73%	74,73%
Caja de rotación	39,00	25,27%	100,00%
TOTAL	**154,33**		

Tabla 6.76: Mantenciones no programadas en subsistemas del sistema hidráulico, PO23. (fuente: elaboración propia)

Sistema Hidráulico, PO23			
Subsistemas	**Horas Mant.**	**%**	**Acumulado**
4 spool	60,00	51,87%	51,87%
Switch temperatura aceite hidráulico	29,50	25,50%	77,37%
Mangueras	10,00	8,64%	86,01%
Tanque hidráulico	4,92	4,25%	90,26%
Motor enrollacable	4,83	4,18%	94,44%
(en blanco)	3,02	2,61%	97,05%
Bomba 65 Galones	3,00	2,59%	99,64%
Bajo nivel de aceite	0,42	0,36%	100,00%
TOTAL	**115,68**		