

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y
Mecatrónica



**Implementación de Ingeniería de Confiabilidad para Optimizar los Planes
de Gestión de Mantenimiento en los Equipos Pesados de una Empresa de
Movimiento de Tierra.**

Tesis presentada por el Bachiller:

Llamocca Huamani, Genrry

(0009-0002-8042-7081)

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Asesor:

Mg. Castro Valdivia, Jorge Luis

(0000-0002-6748-3612)

Arequipa- Perú

2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 02 de Enero del 2024

Dictamen: 010256-C-EPIMMEM-2024

Visto el borrador del expediente 010256, presentado por:

2011243381 - LLAMOCCA HUAMANI GENRRY

Titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR LOS PLANES DE
GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN LOS EQUIPOS PESADOS DE UNA EMPRESA DE MOVIMIENTO
DE TIERRA.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29479140 - VALENCIA SALAS MARIO JOSE
DICTAMINADOR**



**29529560 - CACERES NUÑEZ AUGUSTO EMILIO CARLOS
DICTAMINADOR**



**43209234 - ALMIRON BACA JONATHAN JOSEPH
DICTAMINADOR**



Implementación de Ingeniería de Confiabilidad para Optimizar los Planes de Gestión de Mantenimiento en los Equipos Pesados de una Empresa de Movimiento de Tierra

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

[idoc.pub](#)

Fuente de Internet

1%

2

[riunet.upv.es](#)

Fuente de Internet

<1%

3

[eprints.ucm.es](#)

Fuente de Internet

<1%

4

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

<1%

5

[baixardoc.com](#)

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to tec

Trabajo del estudiante

<1%

7

[repositorio.uisek.edu.ec](#)

Fuente de Internet

<1%

8

[biblioteca2.ucab.edu.ve](#)

Fuente de Internet

<1%

DEDICATORIA

A mis padres Juan y Lucila por su amor incondicional, por enseñarme que con esfuerzo podemos construir grandes cosas.

A mis hermanos Jorge y Lizandro por su apoyo y confianza, por mostrarme que la familia es lo más importante para afrontar la vida. Por más lejos que estemos, en algún lugar del mundo nos encontraremos.



AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional. Su amor y confianza han sido mi fortaleza y motivación en cada paso de este camino

A mi escuela profesional, a todos mis docentes quienes con paciencia y dedicación contribuyeron en mi formación profesional.

A mi tuna ucsm por hacer de la universidad una de las etapas más importantes de mi vida, los momentos compartidos y las amistades forjadas han enriquecido esta travesía de manera inmensurable.



RESUMEN

Este estudio se centró en la aplicación de la ingeniería de confiabilidad para optimizar los planes de gestión de mantenimiento en el cambio de componentes a una flota de equipo pesado, utilizados en la industria de movimiento de tierra. Los objetivos principales comprendieron el análisis y evaluación del sistema de gestión de mantenimiento de la empresa, la creación de un cuadro de mando integral que abarque indicadores clave de desempeño, la implementación de herramientas de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento para priorizar equipos, sistemas, y componentes, y la determinación de las frecuencias óptimas de reemplazo de componentes mediante el uso del modelo matemático desarrollado por el Ph.D. Andrew K.S. Jardine Profesor e investigador Principal en el Centre for Maintenance Optimization and Reliability Engineering de la Universidad de Toronto.

La metodología que se empleó se basa en los datos históricos de fallas, utilizando un diseño de investigación no experimental y transversal con los registros de las bitácoras de mantenimiento como fuente de datos.

Los resultados de esta investigación dieron como ahorro un promedio del 38% en los costos, en comparación si solo se analizara el tiempo medio entre las fallas, como política única de mantenimiento, y una confiabilidad promedio del 89%, así como también la identificación de equipos críticos, dando como resultado el cargador frontal Komatsu CF-K003 y el camión volquete Volvo CV-V005.

En resumen, este estudio demuestra que la ingeniería de confiabilidad es una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia y confiabilidad en la gestión de mantenimiento de equipos pesados para la industria del movimiento de tierra, lo que conlleva a un ahorro significativo y una mayor disponibilidad de los activos.

Palabras claves:

Ingeniería de confiabilidad, equipos pesados, Weibull.

ABSTRACT

This study focused on the application of reliability engineering to optimize maintenance management plans in the change of components to a fleet of heavy equipment, used in the earthmoving industry. The main objectives included the analysis and evaluation of the company's maintenance management system, the creation of a balanced scorecard that encompasses key performance indicators, the implementation of reliability and maintenance engineering tools to prioritize equipment, systems, and components, and determining optimal component replacement frequencies by using the mathematical model developed by the Ph.D. Andrew K.S. Jardine Professor and Principal Investigator at the Center for Maintenance Optimization and Reliability Engineering at the University of Toronto.

The methodology used is based on historical failure data, using a non-experimental and transversal research design with maintenance log records as a data source.

The results of this research gave an average saving of 38% in costs, in comparison if only the average time between failures were analyzed, as a sole maintenance policy, and an average reliability of 89%, as well as the identification of critical equipment, resulting in the Komatsu CF-K003 front loader and the Volvo CV-V005 dump truck.

In summary, this study demonstrates that reliability engineering is a valuable tool to improve efficiency and reliability in the maintenance management of heavy equipment for the earthmoving industry, leading to significant savings and greater availability of equipment assets.

Keywords:

Reliability engineering, heavy equipment, Weibull.

INTRODUCCIÓN

En el entorno empresarial actual, la gestión eficiente de los activos y el mantenimiento de los equipos de movimiento de tierra son esenciales para garantizar la continuidad operativa y la competitividad de las empresas. La implementación de la ingeniería de confiabilidad se ha convertido en un pilar fundamental para mejorar la gestión de mantenimiento, optimizar los costos y disminuir la probabilidad de fallas de los equipos.

El propósito principal de esta tesis es desarrollar un modelo matemático que permita determinar el momento óptimo para el reemplazo de componentes mecánicos en los equipos pesados teniendo en cuenta la confiabilidad, los costos por correctivos y los costos por cambios preventivos. Este proceso implica una serie de etapas cruciales. En primer lugar, se identifican los equipos más críticos, aquellos cuyo rendimiento tiene un impacto significativo en las operaciones y la productividad de la compañía.

A continuación, se realiza un análisis más profundo para identificar los sistemas más críticos de los equipos. Luego, se desciende al nivel de los componentes específicos dentro de estos sistemas, buscando aquellos que tienen un impacto determinante en la confiabilidad global del equipo. Para modelar la confiabilidad a lo largo del tiempo de los componentes se emplea la distribución de Weibull.

Lo que hace que este enfoque sea singular es la aplicación de un modelo matemático aplicado en la industria naval y aeronáutica, desarrollado por el Ph.D. Andrew K.S. Jardine Profesor e investigador Principal en el Centre for Maintenance Optimization and Reliability Engineering de la Universidad de Toronto. Este modelo, respaldada por investigaciones sólidas, brinda una guía precisa sobre cuándo realizar el cambio de componente, teniendo en cuenta aspectos vitales como los costos preventivos, los costos correctivos y la confiabilidad del componente.

El resultado de esta investigación no solo contribuirá a optimizar los planes de gestión de mantenimiento de las empresas, sino que también ayudará a reducir los tiempos de inactividad no planificados, a mejorar la confiabilidad de los equipos y a fortalecer la posición competitiva de la compañía en la industria del movimiento de tierra. Esta tesis representa un paso adelante en la aplicación práctica de la ingeniería de confiabilidad para impulsar la eficiencia y la rentabilidad en este sector vital.

ÍNDICE

DEDICATORIA	xiv
AGRADECIMIENTO	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
LISTA DE FIGURAS	xxiv
LISTA DE TABLAS	xxvii
CAPÍTULO I	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción de la situación problemática	2
1.2. Definición del problema	3
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. Problema general.....	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo principal.....	3
1.4.2. Objetivo específico.....	3
1.5. Factibilidad de la investigación	4
1.5.1. Factibilidad económica.	4
1.5.2. Factibilidad técnica	4
1.6. Justificación	5
1.7. Alcances.....	5
1.7.1. Alcance temporal.	5
1.7.2. Alcance espacial.....	6
1.7.3. Alcance conceptual.	6
1.8. Metodología	6
1.8.1. Tipo de investigación	6
1.8.2. Nivel de investigación.....	6
1.8.3. Diseño de la investigación	6
1.8.4. Técnicas para recoger información	6
1.8.5. Técnica para procesar información	6
1.8.6. Universo de estudio	7

CAPITULO II	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Antecedentes bibliográficos.....	9
2.2. Gestión de activos	10
2.3. Activo.....	11
2.4. Gestión del mantenimiento	11
2.5. Indicadores de mantenimiento	11
2.5.1. Disponibilidad inherente	11
2.5.2. Tiempo promedio operativo hasta el fallo (TPO)	12
2.5.3. Tiempo promedio fuera de servicio (TPFS).....	12
2.5.4. Frecuencia de fallas (FF).....	13
2.6. Sistemas reparables y no reparables	13
2.6.1. Sistemas no reparables	13
2.6.2. Sistemas reparables	14
2.7. Métodos estadísticos para sistemas no reparables	14
2.7.1. Métodos paramétricos	14
2.7.2. Métodos no paramétricos	15
2.7.3. Métodos semi - paramétricos	15
2.8. Métodos estadísticos para sistemas reparables	16
2.9. Estadística y probabilidad	16
2.9.1. Histograma de frecuencias relativas.....	17
2.9.2. Función de densidad de probabilidad (PDF).....	18
2.9.2.1 Hiperexponencial	19
2.9.2.2 Exponencial.....	20
2.9.2.3 Normal.....	20
2.9.2.4 Weibull.....	21
2.9.3. Función de distribución acumulada (CDF)	22
2.9.4. Función de confiabilidad $R(t)$	23
2.9.5. Tasa de riesgo (Hazard Rate)	24
2.10. Análisis Weibull.....	27
2.10.1. Distribución Weibull.....	27
2.10.1.1 Parámetro de forma (β).....	28
2.10.1.2 Parámetro de escala (η).....	29

2.10.1.3	Parámetro de localización (γ)	30
2.11.	Decisiones de reemplazo de componentes.....	30
2.11.1.	Reemplazo preventivo basado en la edad	32
2.12.	Priorización de equipos y análisis de fallas	33
2.12.1.	Diagrama de Pareto	33
2.12.2.	Diagrama de Jack Knife	34
2.13.	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).....	36
2.14.	Mantenimiento productivo total TPM	37
CAPITULO III.....		38
3.	SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE LA EMPRESA	39
3.1.	Programa de mantenimiento preventivo	39
3.1.1.	Responsabilidades	39
3.1.2.	Solicitud del mantenimiento	39
3.1.3.	Planificación y programación del mantenimiento preventivo	39
3.1.4.	Ejecución del mantenimiento preventivo.....	40
3.1.5.	Registro del mantenimiento	40
3.2.	Programa de mantenimiento correctivo	41
3.2.1.	Responsabilidades	41
3.2.2.	Comunicación de falla o avería.....	41
3.2.3.	Planificación y programación del mantenimiento correctivo	41
3.2.4.	Ejecución del mantenimiento preventivo.....	42
3.2.5.	Registro del mantenimiento	42
3.3.	Nomenclatura de la flota de equipo pesado	42
3.4.	Maestro de equipos	43
3.5.	Organigrama	45
3.6.	Cálculo de KPI's en el área de mantenimiento	46
3.7.	Resumen KPI's de toda la flota	49
CAPITULO IV.....		51
4.	IMPLEMENTACIÓN DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD	52
4.1.	Proceso de implementación	52
4.2.	Cuadro de mando integral e indicadores claves de desempeño	52
4.3.	Priorización de equipos, sistemas y componentes	55
4.3.1.	Diagrama de Jack Knife para la priorización de equipos.....	55

4.3.2.	Diagrama de Jack Knife para la priorización de sistemas.....	57
4.3.3.	Priorización por componentes.....	60
4.4.	Filtrado de datos de los registros de falla del componente	63
4.4.1.	Cargador frontal Komatsu WA470-6.....	63
4.4.2.	Camión volquete Volvo FMX440.....	67
4.5.	Cálculo de confiabilidad de componentes	72
4.5.1.	Uñas del cargador Frontal Komatsu WA470-6.....	72
4.5.2.	Talonerías del cargador frontal Komatsu WA470-6	75
4.5.3.	Pernería adaptadores cargador frontal Komatsu WA470-6.....	78
4.5.4.	Pernería entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6.....	81
4.5.5.	Entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6.....	84
4.5.6.	Empaque tapa de balancines volquete Volvo FMX 440	87
4.5.7.	Tubo flexible de escape largo volquete Volvo FMX 440	90
4.5.8.	Tubo flexible de escape corto volquete Volvo FMX 440	93
4.5.9.	Correa del ventilador volquete Volvo FMX 440	96
4.5.10.	Válvula de freno de motor volquete Volvo FMX 440	99
4.6.	Análisis de costos por cambio preventivo y por falla.....	102
4.6.1.	Uñas cargador frontal Komatsu WA470-6	102
4.6.2.	Talonerías cargador frontal Komatsu WA470-6.....	103
4.6.3.	Pernería adaptadores cargador frontal Komatsu WA470-6.....	104
4.6.4.	Pernería entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6.....	105
4.6.5.	Entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6.....	106
4.6.6.	Empaque de tapa de balancines volquete Volvo FMX 440	107
4.6.7.	Tubo flexible de escape largo volquete Volvo FMX 440	108
4.6.8.	Tubo flexible de escape corto volquete Volvo FMX 440	109
4.6.9.	Correa del ventilador volquete Volvo FMX 440	110
4.6.10.	Válvula de freno de motor volquete Volvo FMX 440	111
4.7.	Desarrollo del modelo matemático	111
4.7.1.	Uñas cargador frontal Komatsu WA470-6	115
4.7.2.	Talonerías cargador frontal Komatsu WA470-6.....	117
4.7.3.	Pernería adaptadores cargador frontal Komatsu WA470-6.....	119
4.7.4.	Pernería entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6.....	121
4.7.5.	Entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6.....	123
4.7.6.	Empaque de tapa de balancines volquete Volvo FMX 440	125

4.7.7. Tubo flexible de escape largo volquete Volvo FMX 440	127
4.7.8. Tubo flexible de escape corto volquete Volvo FMX 440	129
4.7.9. Correa del ventilador volquete Volvo FMX 440	131
4.7.10. Válvula de freno de motor volquete Volvo FMX 440	133
4.8. Plan de mantenimiento resumen	135
Conclusiones	136
Recomendaciones	137
Bibliografía	138
Anexos	140

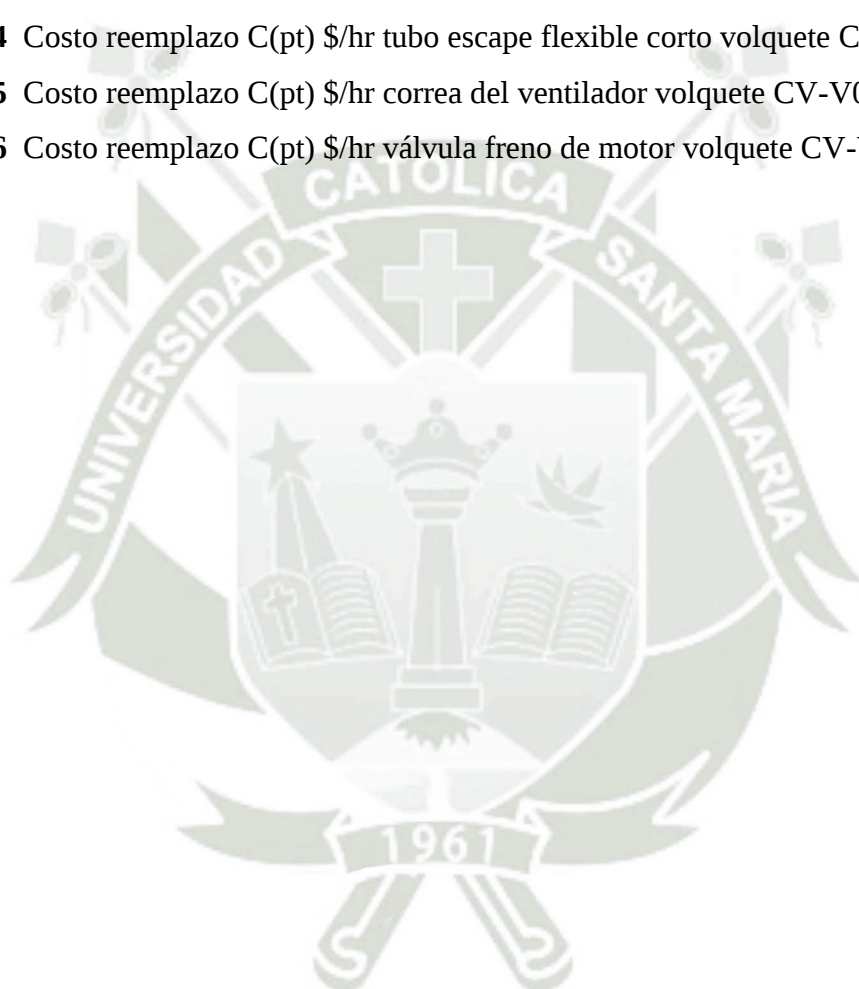


LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Histograma de tiempo hasta la falla	17
Figura 2	Función de densidad.....	18
Figura 3	Función de densidad de probabilidad comunes.....	19
Figura 4	Ejemplos de funciones de distribución acumulada	22
Figura 5	Ejemplos de funciones de confiabilidad.....	24
Figura 6	Ejemplos de tasas de riesgo.....	25
Figura 7	Curva de la bañera.....	26
Figura 8	Funciones Weibull de 2 parámetros	28
Figura 9	Tasa de riesgo de la función Weibull	29
Figura 10	Funciones Weibull con $\gamma = \beta$ y η distinto.....	29
Figura 11	Weibull con $\gamma > 0$	30
Figura 12	Tiempo óptimo de reemplazo.....	32
Figura 13	Ejemplo diagrama de Pareto.....	34
Figura 14	Ejemplo diagrama de Jack Knife.....	36
Figura 15	Nomenclatura de equipos	43
Figura 16	Organigrama de la empresa	45
Figura 17	Proceso de implementación de ingeniería de confiabilidad	52
Figura 18	Diagrama de Jack Knife para la priorización de equipos.....	57
Figura 19	Diagrama de Jack Knife por sistema para el cargador frontal CF-K003	59
Figura 20	Diagrama de Jack Knife por sistema para el camión volquete CV-V005.....	60
Figura 21	Diagrama Pareto número de fallas del bucket del cargador frontal CF-K003 .	61
Figura 22	Diagrama Pareto número de fallas del motor del camión volquete CV-V005.	62
Figura 23	Parámetros de la distribución Weibull uñas del CF-K003	72
Figura 24	Características de la distribución Weibull uñas del CF-K003	72
Figura 25	Probabilidad de falla de las uñas del CF-K003	74
Figura 26	Revisión general de la distribución de falla de las uñas del CF-K003.....	74
Figura 27	Parámetros de la distribución Weibull taloneras del CF-K003.....	75
Figura 28	Características de la distribución Weibull taloneras del CF-K003	75
Figura 29	Probabilidad de falla de las taloneras del CF-K003	77
Figura 30	Revisión de la distribución de falla de las taloneras del CF-K003	77
Figura 31	Parámetros de la distribución de Weibull pernería adapters del CF-K003	78
Figura 32	Características de la distribución de Weibull pernería adapters del CF-K003.	78

Figura 33	Probabilidad de falla pernería adapters del CF-K003	80
Figura 34	Revisión general de la distribución de falla pernería adapters del CF-K003...	80
Figura 35	Parámetros de la distribución Weibull pernería de entredientes del CF-K003	81
Figura 36	Características de la distribución Weibull pernería entredientes del CF-K003	81
Figura 37	Probabilidad de falla pernería entredientes del CF-K003	83
Figura 38	Revisión general distribución de falla pernería entredientes del CF-K003.....	83
Figura 39	Parámetros de la distribución Weibull entredientes del CF-K003	84
Figura 40	Características de la distribución Weibull entredientes del CF-K003	84
Figura 41	Probabilidad de falla entredientes del CF-K003	86
Figura 42	Revisión general de la distribución de falla entredientes del CF-K003	86
Figura 43	Parámetros distribución Weibull empaque tapa de balancines CV-V005	87
Figura 44	Características distribución Weibull empaque tapa de balancines CV-V005..	87
Figura 45	Probabilidad de falla empaque tapa de balancines CV-V005	89
Figura 46	Revisión general distribución de falla empaque tapa de balancines CV-V005	89
Figura 47	Parámetros distribución Weibull tubo flexible escape largo CV-V005	90
Figura 48	Características distribución Weibull tubo flexible escape largo CV-V005	90
Figura 49	Probabilidad de falla tubo flexible escape largo CV-V005.....	92
Figura 50	Revisión distribución de falla tubo flexible escape largo CV-V005.....	92
Figura 51	Parámetros distribución Weibull tubo flexible escape corto CV-V005	93
Figura 52	Características distribución Weibull tubo flexible escape corto CV-V005	93
Figura 53	Probabilidad de falla tubo flexible escape corto CV-V005.....	95
Figura 54	Revisión distribución de falla tubo flexible escape corto CV-V005.....	95
Figura 55	Parámetros distribución Weibull correa del ventilador CV-V005	96
Figura 56	Características distribución Weibull correa del ventilador CV-V005.....	96
Figura 57	Probabilidad de falla correa del ventilador CV-V005.....	98
Figura 58	Revisión distribución de falla correa del ventilador CV-V005.....	98
Figura 59	Parámetros distribución Weibull válvula freno de motor CV-V005.....	99
Figura 60	Características distribución Weibull válvula freno de motor CV-V005	99
Figura 61	Probabilidad de falla válvula freno de motor CV-V005	101
Figura 62	Revisión distribución de falla válvula freno de motor CV-V005	101
Figura 63	Código Matlab para hallar el tiempo medio hasta la falle en t.....	112
Figura 64	Valores de la integral de $t*f(t)$ pata tiempos de 300 a 480 horas	113
Figura 65	Datos para el cálculo de la frecuencia optima de cambio preventivo	114
Figura 66	Datos de confiabilidad, probabilidad de falla, TPO y $C(tp)$ para $T(hrs)$	114

Figura 67	Costo reemplazo C(pt) \$/hr uñas cargador frontal CF-K003	115
Figura 68	Costo reemplazo C(pt) \$/hr taloneras cargador frontal CF-K003	117
Figura 69	Costo reemplazo C(pt) \$/hr pernería adapters cargador frontal CF-K003	119
Figura 70	Costo reemplazo C(pt) \$/hr pernería entredientes cargador frontal CF-K003	121
Figura 71	Costo reemplazo C(pt) \$/hr entredientes cargador frontal CF-K003	123
Figura 72	Costo reemplazo C(pt) \$/hr empaque tapa balancines volquete CV-V005	125
Figura 73	Costo reemplazo C(pt) \$/hr tubo escape flexible largo volquete CV-V005 ..	127
Figura 74	Costo reemplazo C(pt) \$/hr tubo escape flexible corto volquete CV-V005 ..	129
Figura 75	Costo reemplazo C(pt) \$/hr correa del ventilador volquete CV-V005	131
Figura 76	Costo reemplazo C(pt) \$/hr válvula freno de motor volquete CV-V005	133



LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Maestro de equipos	44
Tabla 2	KPI's cargador frontal CF-K001	48
Tabla 3	Resumen KPI's de la flota por equipos.....	49
Tabla 4	Resumen KPI'S de la flota por familia	50
Tabla 5	Cuadro de mando integral perspectiva financiera y hacia los clientes	53
Tabla 6	Cuadro de mando integral perspectiva de procesos internos y aprendizaje.....	54
Tabla 7	TPFS, FF e ID% promedio de toda la flota	56
Tabla 8	KPI's por sistemas del cargador frontal CF-K003.....	58
Tabla 9	KPI's por sistemas del camión volquete CV-V005	59
Tabla 10	Número de fallas para el cargador frontal CF-K003	61
Tabla 11	Número de fallas para el motor del camión volquete CV-V005	62
Tabla 12	Datos de falla de uñas del cargador frontal CF-K003.....	63
Tabla 13	Datos de falla de taloneras del cargador frontal CF-K003	64
Tabla 14	Datos de falla pernería de adaptadores del cargador frontal CF-K003.....	65
Tabla 15	Datos de falla pernería de entredientes del cargador frontal CF-K003	66
Tabla 16	Datos de falla de entredientes del cargador frontal CF-K003.....	67
Tabla 17	Datos de falla del empaque tapa de balancines del volquete CV-V005	68
Tabla 18	Datos de falla tubo de escape flexible largo del volquete CV-V005.....	68
Tabla 19	Datos de falla tubo de escape flexible corto del volquete CV-V005.....	69
Tabla 20	Datos de falla correa de ventilador del volquete CV-V005.....	70
Tabla 21	Datos de falla válvula freno de motor del volquete CV-V005	71
Tabla 22	Probabilidad de falla de las uñas cargador frontal CF-K003.....	73
Tabla 23	Probabilidad de falla de las taloneras cargador frontal CF-K003.....	76
Tabla 24	Probabilidad de falla de pernería adapters cargador frontal CF-K003	79
Tabla 25	Probabilidad de falla pernería entredientes cargador frontal CF-K003.....	82
Tabla 26	Probabilidad de falla para los entredientes cargador frontal CF-K003.....	85
Tabla 27	Probabilidad de falla empaque tapa de balancines volquete CV-V005.....	88
Tabla 28	Probabilidad de falla tubo flexible escape largo volquete CV-V005	91
Tabla 29	Probabilidad de falla tubo flexible escape corto volquete CV-V005	94
Tabla 30	Probabilidad de falla correa del ventilador volquete CV-V005.....	97
Tabla 31	Probabilidad de falla válvula freno de motor volquete CV-V005.....	100
Tabla 32	Costo por cambio preventivo de uñas del cargador frontal CF-K003	102

Tabla 33	Costo por cambio correctivo de las uñas del cargador frontal CF-K003.....	102
Tabla 34	Costo por cambio preventivo de taloneras del cargador frontal CF-K003	103
Tabla 35	Costo por cambio correctivo de taloneras cargador frontal CF-K003.....	103
Tabla 36	Costo cambio preventivo pernería adapters cargador frontal CF-K003	104
Tabla 37	Costo cambio correctivo pernería adapters cargador frontal CF-K003	104
Tabla 38	Costo cambio preventivo pernería entredientes cargador frontal CF-K003	105
Tabla 39	Costo cambio correctivo pernería entredientes cargador frontal CF-K003	105
Tabla 40	Costo cambio preventivo entredientes cargador frontal CF-K003	106
Tabla 41	Costo cambio correctivo entredientes cargador frontal CF-K003	106
Tabla 42	Costo cambio preventivo empaque tapa de balancines volquete CV-V005	107
Tabla 43	Costo cambio correctivo empaque tapa de balancines volquete CV-V005.....	107
Tabla 44	Costo cambio preventivo tubo flexible de escape largo volquete CV-V005...	108
Tabla 45	Costo correctivo tubo flexible de escape largo volquete CV-V005	108
Tabla 46	Costo cambio preventivo tubo flexible de escape corto volquete CV-V005...	109
Tabla 47	Costo correctivo tubo flexible de escape corto volquete CV-V005	109
Tabla 48	Costo cambio preventivo correa del ventilador volquete CV-V005.....	110
Tabla 49	Costo cambio correctivo correa del ventilador volquete CV-V005.....	110
Tabla 50	Costo cambio preventivo válvula freno de motor volquete CV-V005	111
Tabla 51	Costo correctivo válvula freno de motor volquete CV-V005	111
Tabla 52	Resumen resultados cambio de uñas cargador frontal CF-K003.....	115
Tabla 53	R(t), F(t) y C(tp) cambio uñas cargador frontal CF-K003.....	116
Tabla 54	Resumen resultados cambio taloneras cargador frontal CF-K003	117
Tabla 55	R(t), F(t) y C(tp) cambio taloneras cargador frontal CF-K003.....	118
Tabla 56	Resumen resultados cambio pernería adapters cargador frontal CF-K003	119
Tabla 57	R(t), F(t) y C(tp) cambio pernería adapters cargador frontal CF-K003.....	120
Tabla 58	Resumen resultados cambio pernería entredientes cargador frontal CF-K003	121
Tabla 59	R(t), F(t) y C(tp) cambio pernería entredientes cargador frontal CF-K003.....	122
Tabla 60	Resumen resultados cambio de entredientes cargador frontal CF-K003.....	123
Tabla 61	R(t), F(t) y C(tp) cambio de entredientes cargador frontal CF-K003	124
Tabla 62	Resumen resultados cambio empaque tapa de balancines volquete CV-V005	125
Tabla 63	R(t), F(t) y C(tp) cambio empaque tapa balancines volquete CV-V005	126
Tabla 64	Resumen resultados cambio tubo de escape flexible largo volquete CV-V005	127
Tabla 65	R(t), F(t) y C(tp) cambio tubo de escape flexible largo volquete CV-V005 ...	128
Tabla 66	Resumen resultados cambio tubo escape flexible corto volquete CV-V005...	129

Tabla 67	R(t), F(t) y C(tp) cambio tubo escape flexible corto volquete CV-V005	130
Tabla 68	Resumen resultados cambio correa del ventilador volquete CV-V005	131
Tabla 69	R(t), F(t) y C(tp) cambio correa del ventilador volquete CV-V005	132
Tabla 70	Resumen resultados cambio válvula freno de motor volquete CV-V005	133
Tabla 71	R(t), F(t) y C(tp) cambio válvula freno de motor volquete CV-V005	134
Tabla 72	Frecuencia de cambio de componentes para el cargador frontal WA470-6	135
Tabla 73	Frecuencia de cambio de componentes para el camión volquete FMX-440 ...	135





CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la situación problemática

La empresa está ubicada en el distrito de Cerro Colorado, Provincia de Arequipa, departamento de Arequipa. Su giro de negocio es brindar servicios de habilitación de carreteras, Plataformas, Haul Road, áreas de plantas industriales, botaderos, Pad's, relaveras y todo lo relacionado con los servicios de movimiento de tierra.

Realiza Servicios en diferentes unidades mineras del país, apoyado de una flota de equipos pesados, dentro de ellos cargadores frontales sobre ruedas Komatsu WA470-6, Excavadoras hidráulicas Komatsu PC350LC-8, Tractor de Oruga Komatsu D155AX-6, Volquetes Volvo FMX440 6x4 y Volquetes Volvo FMX480 8X4.

La empresa cuenta con sistema de gestión del mantenimiento deficiente, cuenta con un programa de mantenimiento preventivo y correctivo que es realizado por terceros, lleva un control de fallas analizando solamente la disponibilidad mecánica. No tiene definido los objetivos, estrategias y responsabilidades del área de mantenimiento fuera del índice de disponibilidad.

No se tiene una jerarquía de los activos, por lo que carece de análisis de los puntos débiles que representan alto impacto para la organización.

La cadena de suministros del área de mantenimiento no tiene una jerarquía de repuestos críticos, dificultando la respuesta inmediata ante correctivos de emergencia, aumentando los costos de adquisición y traslados hacia los proyectos.

Los programas de mantenimiento preventivo están limitados a los cambios dados por los fabricantes que muchas veces los intervalos no son los adecuados por las condiciones de trabajo, no se realiza análisis de confiabilidad del histórico de fallas de los sistemas reparables y no reparables para su óptimo cambio y/o reemplazo preventivo, lo que incurre en altos costos por fallas.

No se tiene una comparación de los costos por cambios preventivos y por fallas, ni el intervalo óptimo de cambio bajo un análisis costo beneficio. Por lo que requiere revisión y mejora de los planes de mantenimiento preventivos y los recursos necesarios.

1.2. Definición del problema

Baja disponibilidad y confiabilidad de los activos por ineficientes planes de gestión de mantenimiento de la flota de equipo pesado generan altos costos operativos a la organización.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo implementar ingeniería de confiabilidad para optimizar los planes de gestión de mantenimiento de una flota de equipo pesado?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la situación actual de la Gestión del Mantenimiento de la flota de equipo pesado de la empresa?
- ¿Qué métodos estadísticos o herramientas se deben usar para optimizar los planes de mantenimiento de sistemas no reparables aplicados a una flota de equipo pesado?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo principal

Implementar ingeniería de confiabilidad para optimizar los planes de gestión de mantenimiento para el cambio de componentes de una flota de equipo pesado.

1.4.2. Objetivo específico

- Analizar y evaluar el sistema actual de la gestión del área de mantenimiento.
- Desarrollar un cuadro de mando integral de indicadores claves de desempeño aplicados a la gestión del mantenimiento de flota de equipo pesado.
- Implementar herramientas de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento para priorizar equipos, sistemas, subsistemas y componentes.
- Calcular las frecuencias óptimas de mantenimiento y/o reemplazos de componentes de los sistemas, aplicando modelos de ingeniería de confiabilidad.

1.5. Factibilidad de la investigación

1.5.1. Factibilidad económica.

El desarrollo del proyecto se realizará dentro del horario laboral como funciones propias del cargo, el costo de las horas extras fuera del horario laboral será asumidos por el responsable del proyecto.

Los equipos de trabajo serán conformados por los propios colaboradores de la empresa designadas por el responsable del proyecto como mejora del área, cuyos costos de planillas serán cubiertos por la empresa.

Los costos por el uso de software y desarrollos de macros en Excel son de responsabilidad del investigador, como también los costos por la adquisición de información como libros, artículos, paper, normas etc.

De esta manera resulta viable económicamente la implementación de un nuevo modelo de gestión de mantenimiento usando técnicas de ingeniería de confiabilidad.

1.5.2. Factibilidad técnica

Para el desarrollo del proyecto se contará con una laptop con especificaciones técnicas adecuadas para el uso de software de ingeniería (Matlab, Minitab, Weibull Dr, etc.) con acceso a internet, con licencias vigente de Microsoft Office para procesamiento de la información.

La adquisición de software adicionales y las capacitaciones técnicas del uso de las plataformas serán de responsabilidad del investigador.

La recopilación de la data se hará de las bitácoras de mantenimiento existentes, que incluyen información de los informes de mantenimiento por servicios preventivos y correctivos, check list, Backlog, etc.

De esta manera todas las necesidades técnicas serán cubiertas, haciendo viable la investigación.

1.6. Justificación

El mantenimiento juega un rol importante en la industria del movimiento de tierra, debido a que los costos por indisponibilidad de la flota de equipo pesado tienen un gran impacto económico.

Las fallas causadas por malas prácticas de mantenimiento se perciben como un factor dominante que limitan las capacidades de producción, la calidad de los productos y la rentabilidad a las organizaciones. Para superar estas fallas, las organizaciones utilizan diferentes técnicas de mantenimiento con el fin de eliminar los errores de diseño, operación e instalación.

Estas fallas podrían tener consecuencias monetarias altas por costos de mantenimiento y pérdidas de producción, por lo que es necesario predecir y analizar la confiabilidad de equipos reparables y no reparables para reducir las ocurrencias de falla, aumentar la confiabilidad y disponibilidad.

La técnica como RCM determinan las tácticas de mantenimiento que se aplicarán a un activo, pero no indican cuando o a que intervalos realizar las acciones de mantenimiento, para ello usar modelos matemáticos de confiabilidad nos ayudaría a tomar decisiones de reemplazos óptimos para sistemas no reparables.

Se justifica esta investigación porque se espera que con la implementación de la ingeniería de confiabilidad por modelos estadísticos se logrará optimizar los planes de mantenimiento de sistemas no reparables aplicados a una flota de equipo pesado.

1.7. Alcances

1.7.1. Alcance temporal.

Se estima que el tiempo total para la recolección de datos, análisis de información e implementación de ingeniería de confiabilidad por modelos estadísticos es de 6 meses.

La información recolectada y analizada de los históricos de fallas, check list, bitácoras de mantenimiento y backlog, serán hasta los registros el segundo semestre del año 2022.

1.7.2. Alcance espacial.

El desarrollo e implementación del proyecto se llevará en una empresa dedicada a prestar servicios de movimiento de tierra, ubicado en el distrito de Cerro Colorado, Provincia de Arequipa, Departamento de Arequipa.

1.7.3. Alcance conceptual.

- Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (RAM)
- Modelos estadísticos de confiabilidad

1.8. Metodología

1.8.1. Tipo de investigación

El tipo de la investigación es aplicada, en base al histórico de fallas se busca lograr estrategias para optimizar los planes mantenimiento de los sistemas de los activos.

1.8.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es correlacional, se busca medir el grado de relación que existe entre dos o más variables, conocer el comportamiento de la variable dependiente a partir de la información de la variable independiente.

1.8.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental transversal, con registros de datos de las bitácoras de mantenimiento existentes.

1.8.4. Técnicas para recoger información

Se usará como técnica de recolección de datos, el análisis documental de las bitácoras de mantenimiento, check list, backlog, informes, reportes, etc.

1.8.5. Técnica para procesar información

Se usará como técnica para procesar la información la estadística descriptiva, se argumentará los resultados a partir de los históricos de fallas, usando técnicas de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento.

1.8.6. Universo de estudio

Se hará un análisis de criticidad de componentes, subsistemas, sistemas y equipos de toda la flota de equipo pesado de la empresa, quedando incluidos en la muestra todos los sistemas no reparables con alta criticidad, bajo criterios de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento.





CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes bibliográficos

Fuenmayor (2017) en su artículo denominado “Cálculo de la frecuencia óptima de mantenimiento o reemplazo preventivo de turbinas de Vapor” busca optimizar la frecuencia de mantenimiento preventivo conforme al historial de fallas de las turbinas de vapor teniendo ya desarrollado el plan de mantenimiento (RCM), de no llevar la acción de mantenimiento afectaría a la confiabilidad del activo por consiguiente los costos operacionales se incrementarán (Fuenmayor).

Implementa el modelo de optimización Costo-Riesgo-Beneficio que le permite determinar el nivel óptimo entre el riesgo y los costos asociados para obtener el máximo beneficio o mínimo impacto en el negocio.

Concluyendo que no basta con tener un plan de mantenimiento PERFECTO si no que se debe definir cuándo hacer la acción de mantenimiento. Cuyo estudio se debe revisar y adecuar de acuerdo al contexto operacional del activo, considerando los costos en el ciclo de vida para seleccionar las tareas que sean técnicamente y económicamente factibles.

Morales Retamal (2017) En su tesis de grado “Generación y desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo en base a la criticidad, según criterios de estadísticas de fallas en la empresa QUIMICA CLARINT” de la universidad técnica Federico Santa María de Chile busca desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para los equipos críticos de la planta Masterbatches con el fin de aumentar la disponibilidad y reducir los tiempos fuera de servicio (Morales Retamal, 2017).

Al realizar el estudio de diferentes técnicas de jerarquización de acuerdo a su criticidad, concluyo que se puede analizar a cualquier contexto operativo en base a la existencia de información cuantitativa y al rigor exigido del análisis, para optimizar los planes de mantenimiento.

Los resultados obtenidos luego de los análisis de criticidad mediante Jack Knife y AHP, determinó que los equipos más críticos las extrusoras A, C y D; Sistema extractor de polvo A; Mezclador A1; Tamizador C y las Paletizadoras A y C.

Obteniendo todos los resultados logró desarrollar planes de mantenimiento para cada equipo según su criticidad.

Vergara Lazcano (2014) en su tesis de posgrado “La estadística en el Mantenimiento y reemplazo óptimo en el control de calidad” de la universidad autónoma Metropolitana Iztapalapa de México realizó los análisis estadísticos de tiempos de fallas de sistemas de uno o varios componentes, con el fin de realizar una adecuada planificación de los mantenimientos. Para lograrlo aplicó distintas políticas de mantenimiento preventivo como Mantenimiento basado en la edad, Mantenimiento a intervalo constante y Mantenimiento oportuno (Vergara Lazcano, 2014).

Estudió distintos procedimientos para estimar la función de distribución de falla $F(t)$ y Confiabilidad $R(t)$, para datos completos y datos censurados, considerando otros parámetros como la tasa de falla y el TPO.

La autora concluye que mejorar la confiabilidad cuesta dinero, pero se justifica económicamente si la disminución del costo de falla es al menos igual al aumento del costo debido a la mejora de la confiabilidad.

La política de reemplazo basado en la edad es la que genera el intervalo de reemplazo más largo a diferencia de la política de reemplazo a intervalo constante, con la desventaja de que se tiene que llevar un registro de los tiempos fuera de servicio para calcular la edad del sistema.

2.2. Gestión de activos

Es la actividad coordinada de una organización para obtener valor de los activos. La generación de valor normalmente implicará un balance de costos, riesgos, oportunidades y beneficios de desempeño (ISO 55000, 2012).

Las organizaciones deben mantener un control efectivo y políticas eficientes de activos para generar valor a través del manejo de riesgos y oportunidades, con el fin de lograr el balance de costos deseado, la reducción de riesgos y el desempeño. La gestión de activos traduce los objetivos de la organización en actividades, planes y decisiones relacionadas a los activos, usando un enfoque basado en riesgos.

2.3. Activo

Un activo es un elemento, cosa o entidad que tiene un valor real o potencial para una organización. El valor variará para las diferentes organizaciones y sus accionistas, y puede ser tangible o intangible, financiero o no financiero (ISO 55000, 2012).

2.4. Gestión del mantenimiento

En el contexto actual, el mantenimiento no se puede limitar sólo a la simple disminución de las fallas a partir de acciones de mantenimiento seleccionadas en función de un registro histórico de fallas, este concepto ya no tiene vigencia, por lo cual, el rol del mantenimiento dentro de este nuevo contexto (Gestión de activo) se puede describir de la siguiente forma:

“Preservar la función de los equipos, a partir de la aplicación de estrategias efectivas de mantenimiento, inspección y control de inventarios, que permitan optimizar la Confiabilidad y el Riesgo Operacional de los activos maximizando de esta forma la rentabilidad de los procesos industriales” (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015)

2.5. Indicadores de mantenimiento

Las diferentes empresas y asociaciones de mantenimiento establecen diversos indicadores de gestión u operación, mediante los cuales ejercen un control muy particular de su manejo empresarial. Por eso es muy lógico encontrar múltiples indicadores que persiguen fines muy particulares de las instituciones que los construyen. La recomendación es la misma, trabajar con indicadores internacionales y de validez mundial (Gonzales Fernández, 2004).

2.5.1. Disponibilidad inherente

La disponibilidad es un indicador técnico que nos permite estimar en forma general el porcentaje de tiempo total que un equipo está en condiciones de cumplir su función (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015). La unidad de medida está dada en porcentaje.

Es una relación que muestra la proporción de tiempo útil efectivo frente al tiempo total disponible; la relación está gobernada por parámetros y metodologías de cálculo de orden mundial.

Su cálculo sigue la siguiente fórmula:

$$D(\%) = \frac{TPO}{TPO + TPFS} * 100\% \quad (1)$$

Donde:

$D(\%)$ = Disponibilidad

TPO = Tiempo promedio operativo hasta el fallo

$TPFS$ = Tiempo promedio fuera de servicio

2.5.2. Tiempo promedio operativo hasta el fallo (TPO)

El tiempo medio operativo entre fallas (Mean Time Between Failures) es un indicador técnico que mide el tiempo medio operativo que un equipo es capaz de operar sin interrupciones. La unidad de medida es el tiempo, que puede estar dado en horas, días, semanas, meses, años, etc. (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015). Su cálculo sigue la siguiente fórmula:

$$TPO = \frac{\sum_{i=1}^n TPO_i}{n} = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo fuera de servicio}}{\text{Número de fallas}} \quad (2)$$

Donde:

TPO = Tiempo promedio operativo hasta el fallo

TPO_i = Tiempos operativos hasta la falla

n = Número total de fallas en un periodo dado

2.5.3. Tiempo promedio fuera de servicio (TPFS)

El tiempo medio para para reparar (Mean Time To Repair) es un indicador técnico que mide el tiempo medio que se demora en restituir la función a un sistema para operar después de una falla. La unidad de medida es el tiempo, que puede estar dado en horas, días, semanas, meses, años, etc. (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015)

Su cálculo sigue la siguiente fórmula:

$$TPFS = \frac{\sum_{i=1}^n TPFS_i}{n} = \frac{\text{Tiempo total de Mantenimiento}}{\text{Número de fallas}} \quad (3)$$

Donde:

$TPFS$ = Tiempo promedio fuera de servicio

$TPFS_i$ = Tiempos fuera de servicio

n = Número total de fallas en un periodo dado

2.5.4. Frecuencia de fallas (FF)

La frecuencia de Fallas es un indicador de confiabilidad que mide el número de fallos en un determinado periodo, La unidad de medida del indicador técnico esta dado por el número de fallas sobre horas, días, meses, años, etc. (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2015)

Su cálculo sigue la siguiente fórmula:

$$FF = \frac{1}{TPO} \quad (4)$$

Donde:

FF = Frecuencia de Fallas

TPO = Tiempo promedio operativo hasta el fallo

2.6. Sistemas reparables y no reparables

2.6.1. Sistemas no reparables

Se considera sistemas no reparables a componentes que una vez que fallan se cambian por uno nuevo, dejando el equipo tan bueno como nuevo independientemente del modo de falla. En el análisis de la distribución de los datos de vida, los eventos son estadísticamente independientes y distribuidas en forma idéntica. Esto quiere decir que se analiza los tiempos hasta las fallas, independientemente de los modos de falla y que cada uno posee la misma distribución de probabilidad (i.i.d.).

Cualquier evento que ocurra o no, no hará que los otros eventos puedan tener mayor probabilidad o menor de que ocurran, considerados como intervenciones perfectas, la tasa de fallo es constante.

En sistemas no reparables estos tiempos hasta las fallas se ajustan a modelos estadísticos como Weibull (2 o 3 parámetros), normal, exponencial, log-normal, logística, log-logística, etc. Siguen un proceso homogéneo de Poisson y renovación.

2.6.2. Sistemas reparables

Se dice que un sistema es reparable si puede ser reparado cuando se detecta su falla (Pascual J., 2005). Dentro de esta categoría se encuentran equipos como Tractores, camiones, aviones, etc.

La secuencia de intervalos entre fallas no es independiente e idénticamente distribuida, quiere decir que la tasa de falla varía en el tiempo. Dejan el sistema tan malo como antes de que ocurra la falla. El análisis se realiza con las intervenciones y las horas acumuladas.

2.7. Métodos estadísticos para sistemas no reparables

Los métodos tradicionalmente utilizados en el análisis estadístico para sistemas no reparables se pueden dividir en paramétricos, no paramétricos y semi- paramétricos.

Tienen mayor aplicación los paramétricos, pero son de gran ayuda las estimaciones que se obtienen de los métodos semi paramétricos, ayuda a un análisis más detallado y elaborado (Navas Alvarez, 2017). Los no paramétricos son más sencillos y por ende menos eficiente.

La elección de un método estadístico determinado es en función de su flexibilidad de las funciones de fiabilidad y el ajuste de los datos.

2.7.1. Métodos paramétricos

Estos métodos se ajustan a la confiabilidad obtenida o esperada de un sistema no reparable a las distribuciones estadísticas existentes para que se asemejen a la función densidad de la probabilidad de falla $f(t)$.

Es común el uso de las distribuciones como la exponencial, normal, log-normal, Weibull, etc. El problema consiste en elegir la función que pueda modelarse a una distribución específica, para ello existen tes de tendencia de ajuste que nos ayudan a elegir el tipo de distribución, dentro de ellos se encuentran las tes de bondad de ajuste de Kolmogorov–Smirnov y Anderson-Darling.

De todas las distribuciones estadísticas para modelar datos de fallas, la más usada es la distribución de Weibull en sistemas no reparables.

2.7.2. Métodos no paramétricos

Se basa en la filosofía dejar que los datos decidan por ellos mismos, en los estudios de métodos no paramétricos no se asume ningún tipo de modelo probabilístico, se estiman directamente de los datos. En algunos casos estos métodos no paramétricos no serán suficientes para un análisis correcto de datos, sin embargo, son un paso intermedio hacia un modelo más estructurado. (Navas Alvarez, 2017).

Los métodos estadísticos no paramétricos más usados para sistemas no reparables son:

- Tablas de Vida.
- Estimador Kaplan – Meier.
- Estimador de Nelson – Aalen.

2.7.3. Métodos semi - paramétricos

Corresponden a los modelos de riesgo proporcional, varias aproximaciones han sido propuestas para poder modelar los efectos de las variables a estudiar sobre el tiempo de vida de los sistemas. De las diferentes funciones que pueden describir la distribución de fallas, la más sencilla es modelar la tasa de fallas.

El método estadístico semi – paramétrico más utilizado es el modelo de riesgo proporcional de Cox (Navas Alvarez, 2017).

2.8. Métodos estadísticos para sistemas reparables

La característica principal de los sistemas reparables es que después de un fallo es devuelto la capacidad de realizar todas sus funciones por cualquier método excepto la sustitución. Un sistema reparado puede fallar más de una vez, es importante poder modelar los tiempos entre las fallas.

En la evaluación de la fiabilidad la mayor parte de las magnitudes son variables aleatorias, como el tiempo hasta la falla, tiempo entre fallas, número de fallas en un determinado intervalo. Cada fallo será imprevisto, pero la probabilidad de que ocurra la falla en un intervalo de tiempo determinado se puede estimar.

La tasa de fallo se refiere a sistemas reparables y no reparables, pero en la práctica la tasa de falla se utiliza para sistemas no reparables, como componentes o piezas. La tasa de fallo está asociada con una distribución de tiempo hasta la falla.

La intensidad de falla se refiere exclusivamente a sistemas reparables, eso significa que se puede estimar empleando los sucesivos tiempos entre fallas. Por lo tanto, la distribución estadística de los fallos en elementos reparables no tiene un comportamiento asimilable a los sistemas no reparables. Por lo que se modelan utilizando otros modelos estadísticos.

Los modelos estadísticos que destacan son el postulado de Duane, métodos gráficos de tendencia, procesos estocásticos, métodos basados en cadenas estocásticas, métodos basados en procesos de Poisson homogéneos (HPP), métodos basados en procesos de Poisson no homogéneos (NHPP), métodos basados en procesos de renovación (RP), métodos basados en procesos estocásticos imperfectos y otros.

2.9. Estadística y probabilidad

Debido a la incertidumbre que existe en el área de mantenimiento, no se sabe cuándo fallará el equipo o el sistema, por lo que se requiere conocimiento de estadísticas y probabilidades. En esta sección se incluye las bases teóricas de la estadística.

Las decisiones relativas a problemas de mantenimiento probabilístico, requieren información sobre cuando el equipo fallará. Es complicado saber cuándo ocurrirá la siguiente falla, pero es posible obtener información sobre la probabilidad de que ocurra en cualquier momento en particular.

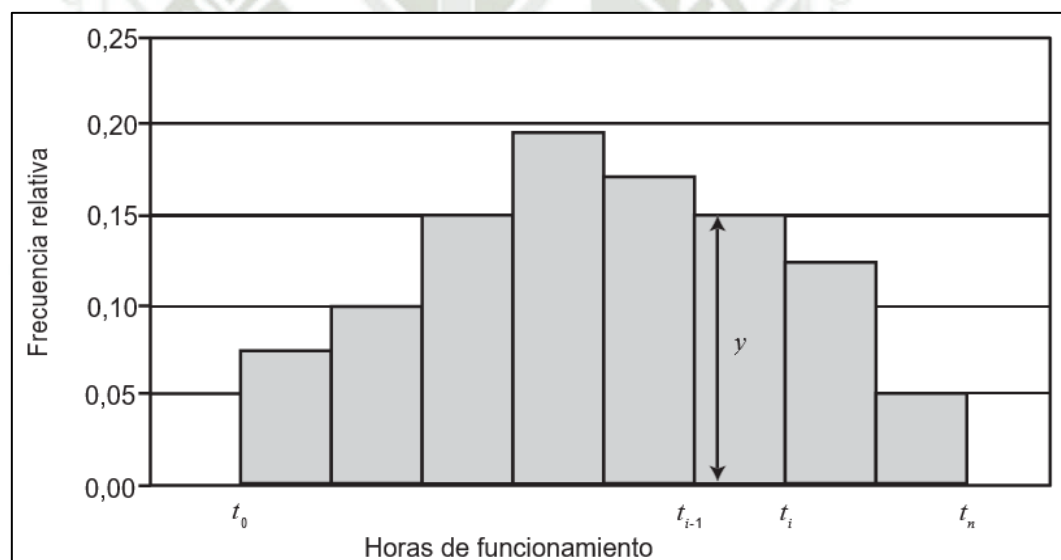
Cuando se determinan las decisiones óptimas de mantenimiento, se requiere conocimientos de estadísticas para hacer frente a tales problemas probabilísticos.

2.9.1. Histograma de frecuencias relativas

Si tenemos varios equipos similares que están sujetos a averías, es falso suponer que todos fallarán después de una misma cantidad de horas de operación. Al observar el tiempo de funcionamiento de cada equipo hasta la falla, es posible dibujar un histograma en el que el área asociada con cualquier intervalo de tiempo muestra la frecuencia relativa de falla que ocurre entre estos intervalos, Se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Histograma de tiempo hasta la falla



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

Si se desea determinar la probabilidad de que ocurra una falla entre los tiempos t_{i-1} y t_i , debemos multiplicar la ordenada “y” por el intervalo (t_{i-1}, t_i) . Un análisis más detallado de la Figura mostrará que la probabilidad de que ocurra una falla entre los tiempos t_0 y t_n (tiempo más recientes y tardíos en los que el equipo ha fallado) es la unidad. Lo que significa que estamos seguros de que la falla ocurre en el intervalo (t_0, t_n) y el área del histograma equivale a 1.

2.9.2. Función de densidad de probabilidad (PDF)

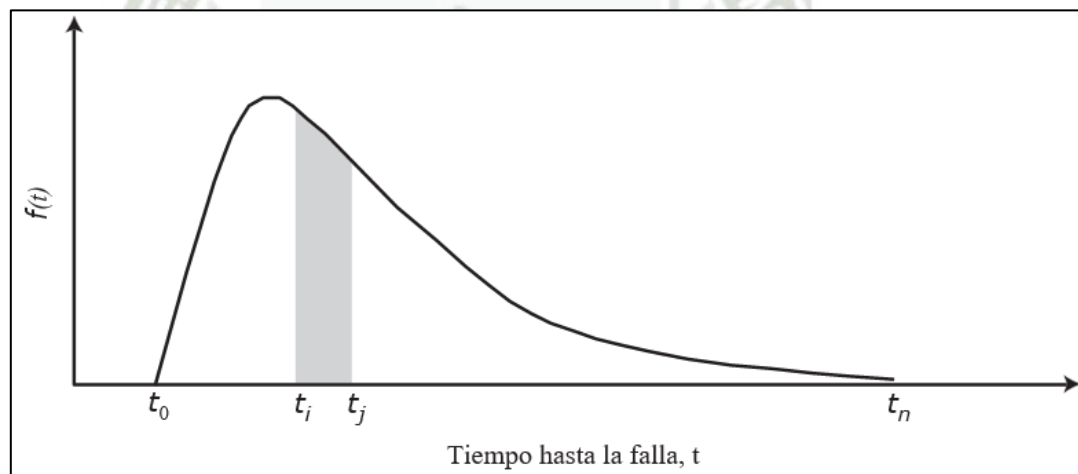
En los estudios de mantenimiento se tiende a utilizar las funciones de densidad de probabilidad (PDF), a diferencia de los histogramas de frecuencia relativa, debido a:

1. Las variables a modelar son continuas (ejem. Tiempo entre falla).
2. Las funciones de densidad son más fáciles de manipular.
3. Proporcionan una mejor comprensión de la distribución de fallas.

Los PDF son similares a los histogramas de frecuencia relativa, en lugar de barras se usan una curva continua. La ecuación de la curva de la PDF se denota como $f(t)$.

Figura 2

Función de densidad



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

El área debajo de la curva $f(t)$ también es equivalente a 1, de la misma forma que en el área bajo el histograma de frecuencia relativa. En la Figura 2, la probabilidad de que ocurra una falla entre los tiempos t_i y t_j es el área de la región sombreada de la curva, mediante cálculo esta área es la integral de $f(t)$ desde el tiempo t_i hasta t_j , es decir:

$$F(t) = \int_{t_i}^{t_j} f(t) dt \quad (5)$$

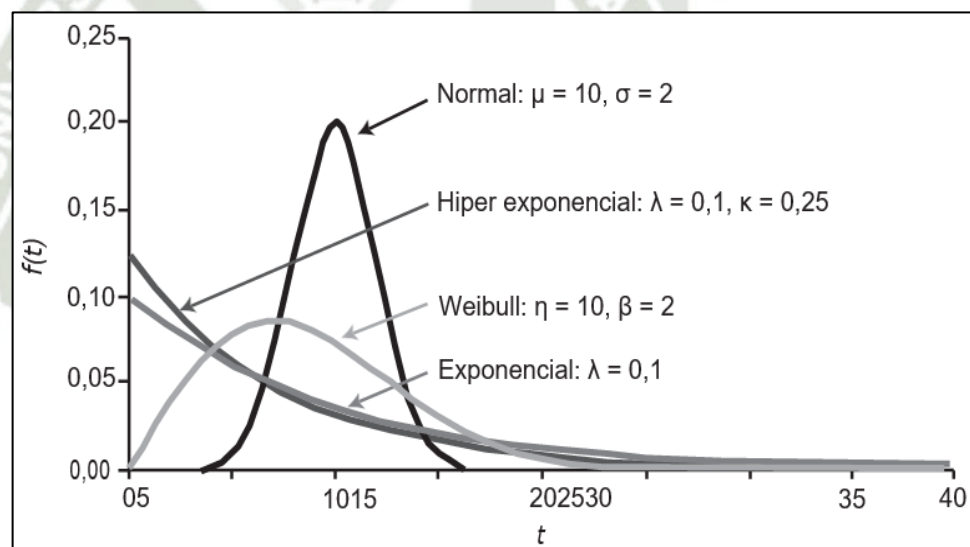
De acuerdo a la Figura 6, se cumple también que la ecuación 5 es igual a:

$$F(t) = \int_{t_0}^{t_n} f(t)dt = 1 \quad (6)$$

No hace falta mencionar que es probable que las características de los datos de falla de diferentes elementos del equipo sean diferentes entre sí, incluso si se trata de equipos idénticos si operan en distintos entornos. Existe una serie de PDF para describir características de datos de fallas de los sistemas, la elección de la PDF adecuado va a depender del ajuste de bondad con cada uno de las funciones de densidad de probabilidad, se muestra la Figura 3.

Figura 3

Función de densidad de probabilidad comunes



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

1.3.2.1 Hiperexponencial

Cuando el tiempo de falla es muy largo o muy corto, la PDF puede ajustarse a la Hiperexponencial.

La función de densidad de la distribución Hiperexponencial es:

$$f(t) = 2k^2\lambda e^{-2k\lambda t} + 2(1-k)^2\lambda e^{-2(1-k)\lambda t} \quad (7)$$

Para $t \geq 0, 0 < k \leq 0.5$

Donde λ es la tasa de fallas y k es un parámetro de la distribución.

1.3.2.2 Exponencial

Es aquella en la que la falla del equipo puede ser causada por la falla de cualquiera de sus componentes, es característico de equipos sujetos a fallas aleatorias. Es típico de componentes electrónicos y plantas industriales.

La función de densidad de la distribución exponencial es:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Para $t \geq 0$.

Donde λ es la tasa de fallas y su inversa representa la media de la distribución.

La función exponencial está relacionada con la distribución de Poisson. Si el tiempo entre fallas sigue una distribución exponencial, la llegada de la falla sigue un proceso de Poisson.

La probabilidad de observar n fallas en un determinado intervalo de tiempo $(0, t)$, se puede determinar mediante esta distribución.

Sigue la siguiente ecuación:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (9)$$

Para $t \geq 0$, n es un número entero no negativo.

Donde λ es la media de la tasa de falla

1.3.2.3 Normal

La distribución normal también conocida como la distribución Gaussiana se aplica cuando el tiempo entre fallas (resultado aleatorio) es el efecto aditivo de un gran número de pequeños e independientes variaciones.

Es de aplicación esta función estadística para modelar la vida útil de bombillas eléctricas y hasta la primera falla de motores de autobuses.

La función de densidad de la distribución es:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (10)$$

Para: $-\infty < t < \infty$

Donde μ es la media y σ es la desviación estándar de la distribución.

Considerar que para la distribución normal:

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt < 1; \quad (11)$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (12)$$

1.3.2.4 Weibull

La distribución de Weibull se adapta a una gran cantidad de características de fallas, es considerada de mayor aplicación ya que el ajuste de bondad a su distribución muestra datos menores a comparación de otras distribuciones, sus variaciones más comunes son de dos y tres parámetros.

La función de densidad de la distribución de Weibull de dos parámetros es:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]} \quad (13)$$

para $t \geq 0$

Donde η es el parámetro de escala (vida característica), β es el parámetro de forma, ambos valores son positivos.

La distribución de Weibull de dos parámetros es equivalente a la distribución exponencial cuando $\beta=1$, si $\beta=2$ es equivalente a la distribución de Rayleigh y para $\beta=3.44$ se aproxima a la normal.

2.9.3. Función de distribución acumulada (CDF)

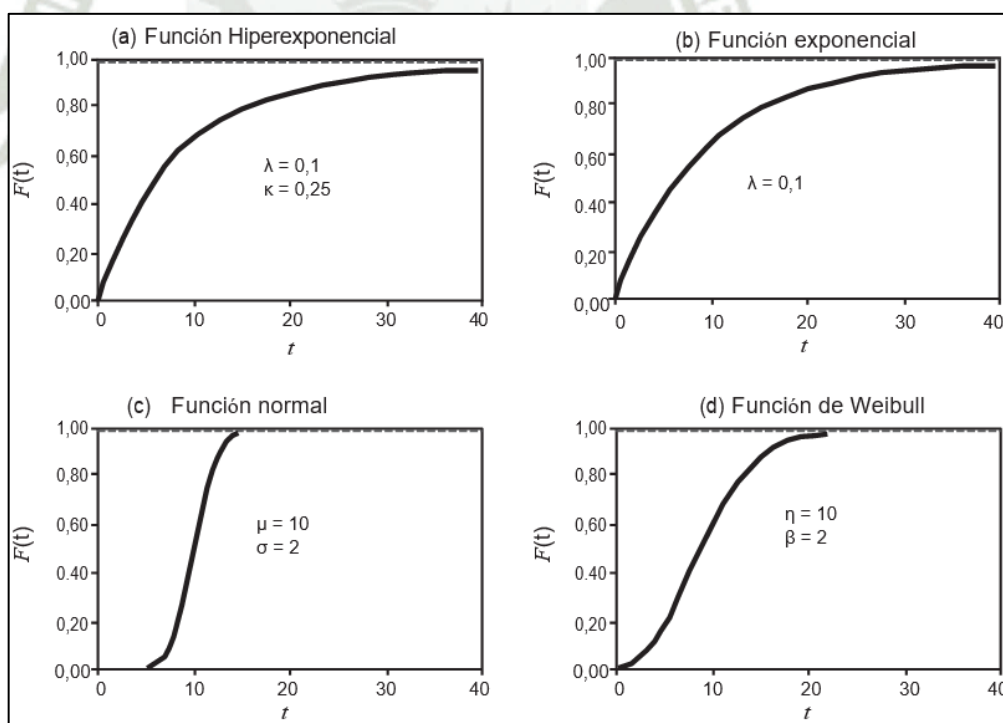
En los estudios de mantenimiento nos interesa saber la probabilidad de que ocurra una falla antes de un tiempo específico (tiempo t). Es calculada de la PDF como indica la ecuación 6, tomando en consideración el tiempo cero hasta el tiempo t , quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (14)$$

Nótese que la integral se denota como $F(t)$ y es denominada como la distribución acumulativa de la función. Cuando t tiende al infinito, el valor de $F(t)$ tiende a 1.

Se muestra en la Figura 4, ejemplos de las funciones de distribución acumuladas de las PDF descritas en la sección anterior.

Figura 4
Ejemplos de funciones de distribución acumulada



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

Efectuada la integrable de las funciones de densidad de las diferentes distribuciones se obtienen las siguientes funciones de distribución acumulada (CDF):

1. Función Hiperexponencial.

$$F(t) = 1 - ke^{-2k\lambda t} - (1 - k)e^{-2(1-k)\lambda t} \quad (15)$$

2. Función Exponencial.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (16)$$

3. Función Normal.

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dt \quad (17)$$

4. Función Weibull.

$$F(t) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (18)$$

2.9.4. Función de confiabilidad R(t)

La función de confiabilidad es una función complementaria a la CDF, conocida también como función de supervivencia, se determina como la probabilidad de que el equipo sobreviva al menos durante un tiempo determinado (t), Es denotada como $R(t)$ y definida como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (19)$$

Se cumple:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (20)$$

Si t tiende al infinito el valor de $R(t)$ tiende a cero.

Conociendo las funciones de distribución acumulada (CDF) y aplicando la ecuación anterior se obtiene las siguientes funciones de confiabilidad $R(T)$:

1. Función Hiperexponencial.

$$R(t) = ke^{-2k\lambda t} + (1 - k)e^{-2(1-k)\lambda t} \quad (21)$$

2. Función Exponencial.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (22)$$

3. Función Normal.

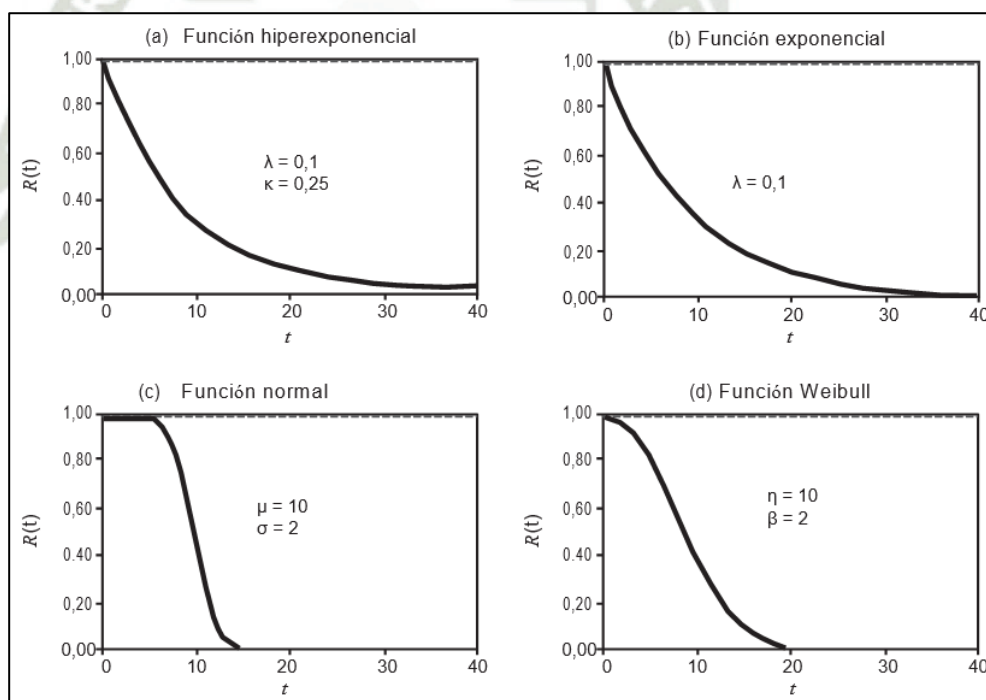
$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} dt \quad (23)$$

4. Función Weibull.

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (24)$$

Se muestra en la Figura 5, ejemplos de las funciones de confiabilidad de las PDF descritas.

Figura 5
Ejemplos de funciones de confiabilidad



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

2.9.5. Tasa de riesgo (Hazard Rate)

Este concepto es utilizado con frecuencia en los estudios de sustitución, ya que representa una característica estadística de los equipos, también conocida como tasa de falla.

La estimación de la tasa de falla de un sistema en cualquier momento se considera como la relación entre el número de elementos que fallaron en un intervalo de tiempo (t) y el número total de la población operativa inicial. Por lo tanto, la tasa de riesgo de un sistema en el tiempo t , es la probabilidad de que el componente fallará en el siguiente intervalo de tiempo.

La tasa de riesgo o tasa de falla instantánea está definida como:

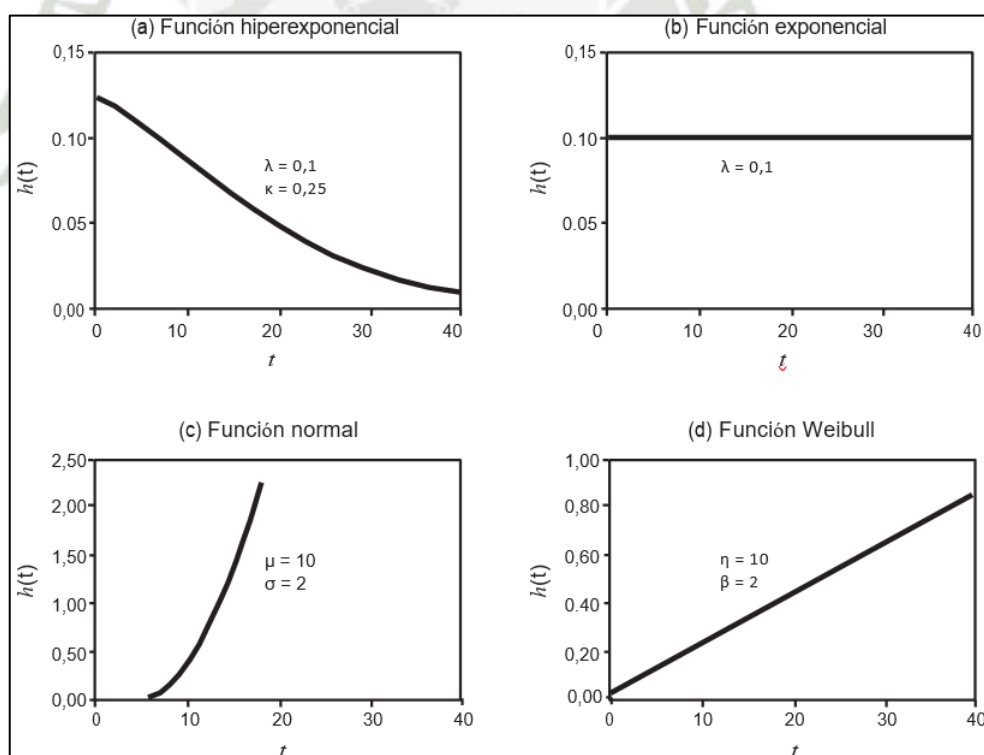
$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (25)$$

La forma de las tasas de riesgo de las PDF, se detallan como ejemplos en la siguiente Figura 6:

Ejemplos de tasas de riesgo

Figura 6

Ejemplos de tasas de riesgo



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

El desarrollo de la ecuación de tasa de riesgo a cada uno de las distribuciones comentadas se detalla a continuación:

1. Función Hiperexponencial.

$$h(t) = \frac{2\lambda[k^2 + (1-k)^2 e^{-2(1-2k)\lambda t}]}{k + (1-k)e^{-2(1-2k)\lambda t}} \quad (26)$$

2. Función Exponencial.

$$h(t) = \lambda \quad (27)$$

3. Función Normal.

$$h(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^\infty e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt} \quad (28)$$

4. Función Weibull.

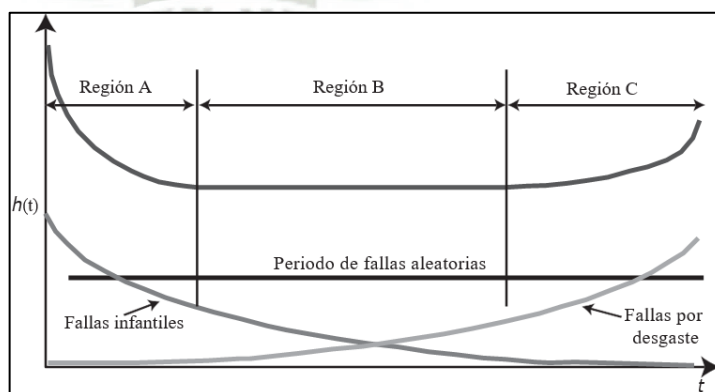
$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (29)$$

Es interesante notar que la tasa de riesgo o tasa de fallas toma diferentes formas con equipos complejos, por razones obvias este patrón es denominado curva de la bañera. Donde se observa 3 regiones que corresponden a:

1. Región A: Fallas iniciales, mortalidad infantil, tasa de falla decreciente
2. Región B: Periodo de fallas aleatorias, vida útil, tasa de falla constante.
3. Región C: Fallas de desgaste, envejecimiento, tasa de falla creciente.

Figura 7

Curva de la bañera



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

Si la única forma de mantenimiento posible es el reemplazo, ya sea de forma preventiva o por falla, en las regiones A y B no se deben aplicar los reemplazos preventivos porque estos reemplazos no reducirán el riesgo de falla del equipo. Se estaría desperdiciando el esfuerzo de mantenimiento.

En la región C, el reemplazo preventivo reducirá el riesgo de fallas en el futuro, y en el momento en que ocurran estas fallas están influenciadas no solo solo por los costos relacionados con repuestos y mano de obra, sino también con el tiempo de inactividad.

2.10. Análisis Weibull

El análisis Weibull es el método más popular para el análisis y predicción de fallas, este método nos brinda información de la categoría de la falla (Mortalidad infantil, fallas aleatorias o desgaste). También proporciona información cuantitativa para la toma de decisiones de la metodología RCM, que a menudo se toman desde un enfoque cualitativo.

2.10.1. Distribución Weibull

Esta distribución lleva el nombre de Waloddi Weibull, quien descubrió que las distribuciones de los datos de vida de los productos se pueden modelar mediante la siguiente función:

para $t \geq \gamma$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (30)$$

$f(t) = 0$ para $t \leq \gamma$

Los parámetros de esta distribución son el parámetro de forma (β), parámetro de localización (γ) y el parámetro de escala (η). Donde β y η son mayores a cero. Es considerado esta función como distribución Weibull de 3 parámetros. La distribución de Weibull de 2 parámetros considera el valor de $\gamma=0$.

Para la estimación de los parámetros de la distribución se usa en la actualidad programas computacionales como Minitab, Weibull Dr, etc.

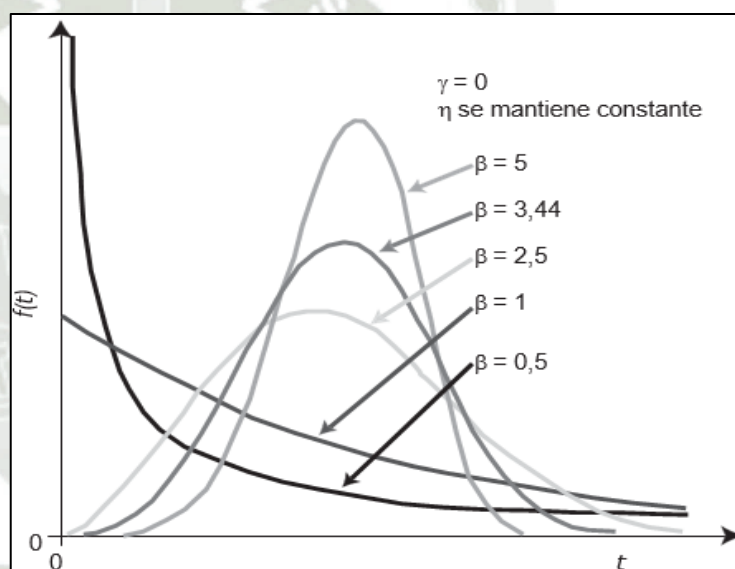
2.10.1.1 Parámetro de forma (β)

Este parámetro determina la forma de la distribución. Cuando $\beta < 1$, la distribución tiene una forma hiperbólica. Cuando $\beta = 1$, se convierte en una función exponencial. Cuando $\beta > 1$, es una función unimodal en la que la simetría cambia de izquierda a derecha a medida que aumenta el valor de β .

La siguiente Figura muestra ejemplos para diferentes valores de β .

Figura 8

Funciones Weibull de 2 parámetros

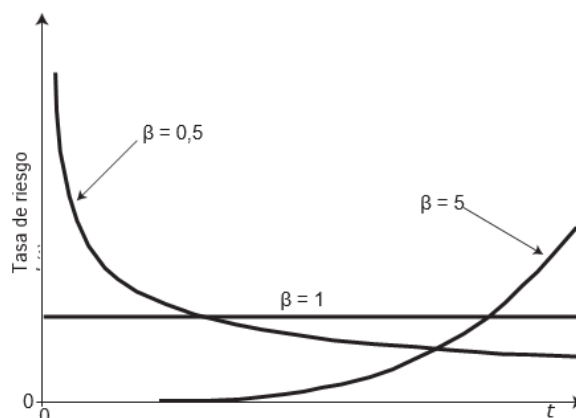


Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

La tasa de riesgo $h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$, varía de acuerdo a la variable t . Cuando $\beta > 1$, $h(t)$ es una función creciente. Cuando $\beta = 1$, $h(t)$ es una función constante. Cuando $\beta < 1$, $h(t)$ es una función decreciente. Se muestra en la siguiente Figura el resumen gráfico:

Figura 9

Tasa de riesgo de la función Weibull



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

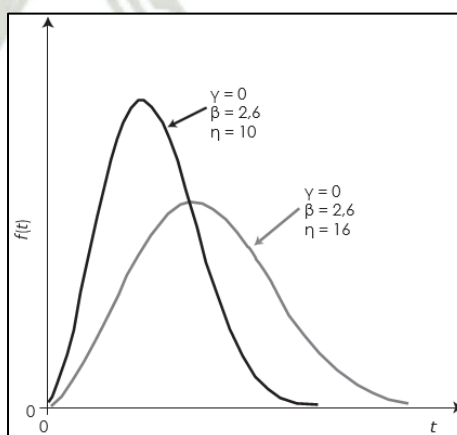
2.10.1.2 Parámetro de escala (η)

Este parámetro extiende o contrae la distribución de la falla a lo largo del eje del tiempo para mismos valores de γ y β , es por ello considerado como el parámetro de escala.

Cuando $t - \gamma = \eta$ en la distribución acumulada de Weibull, $F(t)$ es aproximadamente 63.2% independientemente a los valores de β . Por lo tanto, η es conocido también como la vida característica de la distribución de Weibull.

Figura 10

Funciones Weibull con $\gamma = \beta$ y η distinto



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

2.10.1.3 Parámetro de localización (γ)

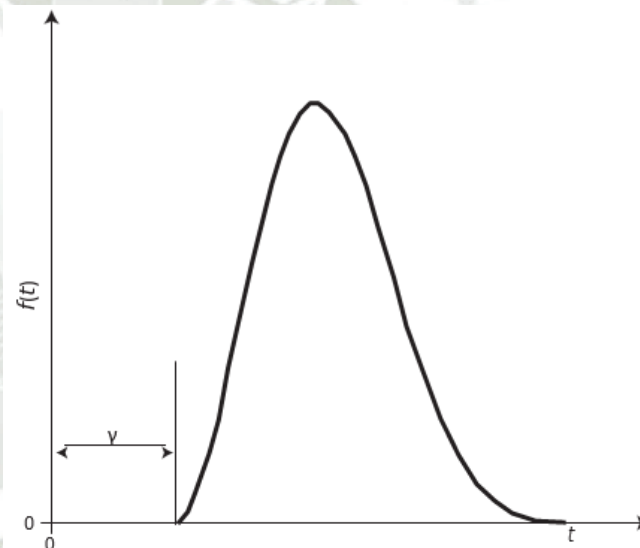
Este parámetro es también conocido como el periodo libre de falla de la distribución, esto se debe a que la PFD de esta distribución es cero cuando el valor de $t \leq \gamma$, lo que significa que no existe riesgo de falla antes de γ .

En la práctica este valor puede ser negativo, lo que significaría que el equipo haya estado en uso antes del $t=0$.

Se muestra el parámetro de localización en la siguiente Figura:

Figura 11

Weibull con $\gamma > 0$



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

2.11. Decisiones de reemplazo de componentes

El interés en esta área de este concepto se debe a que un enfoque común para mejorar la confiabilidad de un sistema o equipo complejo es a través del reemplazo preventivo de componentes críticos dentro del sistema. Por lo tanto, es necesario poder identificar qué componentes deben considerarse para el reemplazo preventivo y cuáles deben dejarse en funcionamiento hasta que fallen. Si el componente es un candidato para el reemplazo preventivo, la siguiente pregunta a responder es: ¿Cuál es el mejor momento? El objetivo principal es hacer que un sistema sea más confiable a través del reemplazo preventivo (Jardine & Tsang, 2014).

Los problemas de reemplazo pueden clasificarse como deterministas y probabilísticos.

Los problemas deterministas son aquellos en los que se supone que se conocen el resultado de la acción de reemplazo y el momento, este es el caso de componentes que no están sujetos a fallas, pero su costo operativo aumenta con el uso. Para reducir este costo se realizan reemplazo y se conocen la tendencia en el costo de operación. El ejemplo de componentes que se deterioran deterministamente son los filtros de combustible.

Los problemas probabilísticos son aquellos donde no se conocen el momento ni el resultado de la acción de reemplazo, estos dependen del azar. El equipo puede describirse como bueno o fallado, la ley de la probabilidad que describe los cambios de buenos a fallados puede describirse mediante la distribución del tiempo entre la finalización de la acción de reemplazo y la falla. El tiempo de falla es una variable aleatoria cuya distribución puede denominarse distribución de fallas del equipo (Jardine & Tsang, 2014).

La determinación de decisiones de reemplazo de componentes con fallas probabilísticas implica un problema de toma de decisiones, es imposible predecir con certeza cuándo ocurrirá la falla. Para ello se asume que solo hay dos condiciones del equipo, bueno o fallido y que esta condición siempre se conoce. De esta manera se construyen modelos matemáticos para la determinación de políticas óptimas de reemplazo.

En la práctica es útil apreciar que la tasa de riesgo del equipo debe aumentar antes de que valga la pena realizar un reemplazo preventivo, para ello se toma en consideración que las acciones de reemplazos preventivo requieren dos condiciones necesarias:

1. Los costos de reemplazo preventivo deben ser menores a los costos después de la falla (siempre y cuando el criterio apropiado es el costo, de lo contrario puede ser cambiado por otro, como el tiempo de inactividad).

2. La tasa de riesgo del equipo debe estar aumentando. Esto significa que al realizar cambios preventivos por ejemplo en una distribución Weibull con $\beta=1$, el reemplazo antes de la falla no afecta la probabilidad de que el equipo falle en el próximo instante, dado que el equipo es bueno. Lo mismo sucede con $\beta<1$, su tasa de riesgo es decreciente, en consecuencia, se pierde dinero y tiempo.

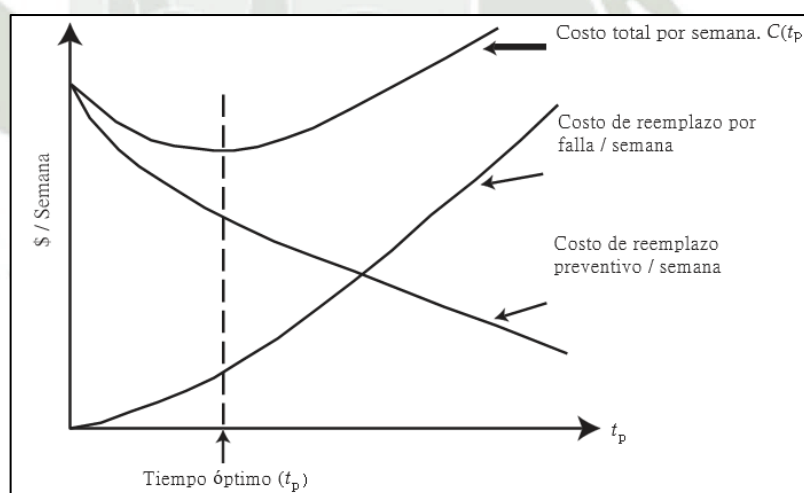
2.11.1. Reemplazo preventivo basado en la edad

El tiempo en el que ocurre el reemplazo preventivo depende de la edad del componente, esto significa que cuando ocurre la falla se hace el reemplazo por falla y el reloj de tiempo se restablece a cero y el reemplazo preventivo ocurre solo cuando el componente ha estado operando durante un periodo específico.

Sin embargo, se requiere un equilibrio entre los costos por reemplazo preventivo y los costos por reemplazo a causa de una falla, es necesario el cálculo del tiempo óptimo de reemplazo.

Figura 12

Tiempo óptimo de reemplazo



Fuente: (Jardine & Tsang, 2014)

El modelo construido por Andrew Jardine (Jardine & Tsang, 2014), considera dos posibles ciclos de operación, la primera determinado por el componente que alcanza el tiempo de reemplazo planificado y la segunda determinada por el componente que ha fallado antes del tiempo de reemplazo planificado.

El cálculo del costo total de reemplazo esperado por unidad de tiempo $C(t_p)$, está definida por:

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)]} \quad (31)$$

Donde $M(t_p)$, es el tiempo medio hasta falla (t_p) de la PDF de los datos de falla modelado.

$$M(t_p) = \int_{-\infty}^{t_p} \frac{tf(t)dt}{1 - R(t_p)} \quad (32)$$

Reemplazando el tiempo medio hasta la falla $M(t_p)$, en $C(t_p)$, queda definido el modelo que relaciona el tiempo de reemplazo t_p , con el costo total de reemplazo esperado por unidad de tiempo.

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} tf(t)dt} \quad (33)$$

Donde:

1. C_p , es el costo total de un reemplazo preventivo.
2. C_f , es el costo total de la reparación por falla.
3. $f(t)$, es la PDF de los tiempos de falla.
4. t_p , es el tiempo óptimo de reemplazo.
5. $M(t_p)$, es el tiempo medio de falla cuando se produce un reemplazo preventivo en t_p .

2.12. Priorización de equipos y análisis de fallas

2.12.1. Diagrama de Pareto

El proceso para desarrollar el diagrama de Pareto para el análisis de fallas, primero se tiene que obtener el listado de modos de fallas y los tiempos fuera de servicio asociados a cada modo de falla, por componentes, sistemas o equipos. El listado debe ser ordenado de mayor a menor y determinar el porcentaje acumulativo que tiene cada uno de los factores, y de esta manera generar el diagrama.

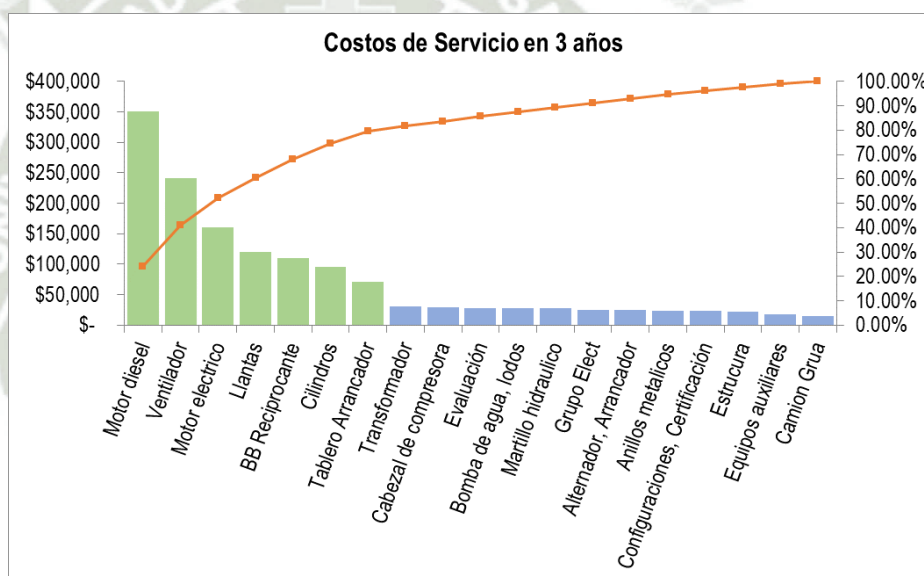
En el resultado gráfico dibujar los límites correspondientes al valor acumulado en 80%, esto nos indica cuales son las descripciones que generan las mayores fallas, y deben de ser de atención en primer lugar.

El diagrama de Pareto permite determinar el 20% de los eventos que generan el 80% de las consecuencias.

De esta manera podemos priorizar los equipos con mayor cantidad de fallas o costos, para luego hacer la revisión de sus planes de mantenimiento para tomar buenas decisiones.

Figura 13

Ejemplo diagrama de Pareto



Fuente: Elaboración propia

2.12.2. Diagrama de Jack Knife

El diagrama de Jack Knife es una técnica de priorización que comparar varios criterios a la misma vez, a diferencia del diagrama de Pareto que solo analiza un solo criterio. Representa los distintos modos de fallas, equipos, sistemas y componentes, en un diagrama donde relaciona el TPFS, frecuencia de falla y la indisponibilidad.

El diagrama nos permite identificar, clasificar y priorizar de manera visual los modos de fallas, equipos, sistemas y componentes con altos TPFS, alta frecuencia de fallas y alta indisponibilidad.

El diagrama de Jack Knife se divide en 4 cuadrantes:

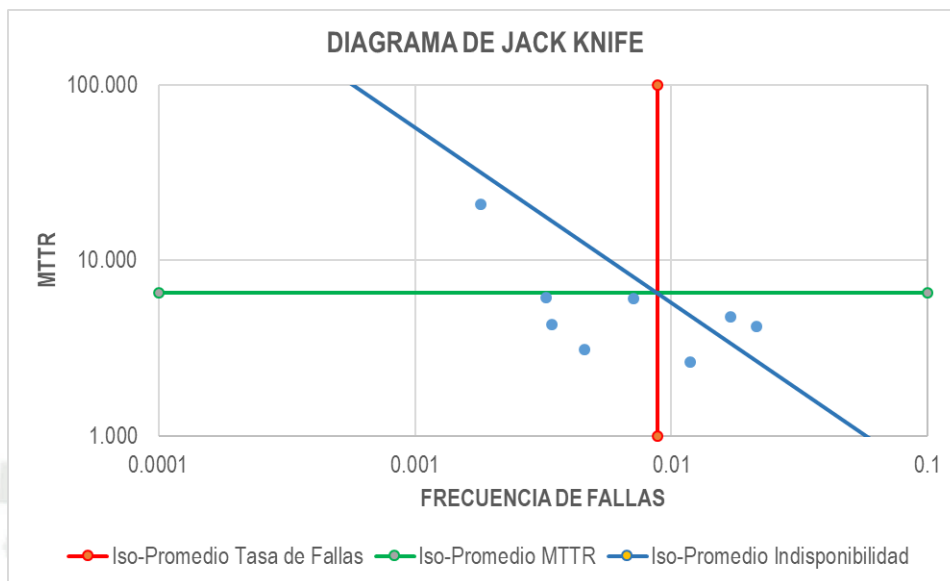
1. El cuadrante superior izquierdo corresponde a las fallas agudas, las fallas son controladas, pero con TPFS alto.
2. El cuadrante inferior derecho corresponde a las fallas crónicas, el TPFS es bajo, pero de alta frecuencia de falla.
3. El cuadrante superior derecho corresponde a una falla aguda o crítica, el TPFS es alto y la frecuencia de falla también es alta.
4. El cuadrante inferior izquierdo corresponde a una falla leve, el TPFS es bajo y la frecuencia de falla también es baja.

En el eje de las abscisas se considera las frecuencias de fallas (λ) y en el eje de las ordenadas los TPFS. Para generar los cuadrantes se deben obtener los promedios de los datos y graficar las dos rectas paralelas a los ejes ordenados, generando así los 4 cuadrantes. Adicionalmente se puede trazar las curvas de la indisponibilidad (ID), que en la escala logarítmica es representada por una recta, de esta manera ayudando la construcción e interpretación del diagrama desde el punto de vista de la confiabilidad y mantenibilidad.

$$ID = \lambda * MTTR \quad (34)$$

Donde:

1. ID , es la indisponibilidad.
2. λ , es la frecuencia de fallas.
3. $MTTR$, es el tiempo medio para reparar

Figura 14
Ejemplo diagrama de Jack Knife


Fuente: Elaboración propia

2.13. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

RCM es una metodología estructurada para determinar el requisito de mantenimiento de un activo físico en su contexto operativo. El activo puede ser parte de un sistema más grande. El objetivo principal de RCM es preservar la función del sistema en lugar de mantener un activo en servicio. La aplicación del RCM requiere una comprensión completa de las funciones de los activos físicos y la naturaleza de las fallas relacionadas con estas funciones. Reconoce que no todas las fallas se crean de la misma manera, y algunas fallas no pueden prevenirse mediante una revisión o reemplazo preventivo. Por lo tanto, no se realizarán acciones de mantenimiento que no sean rentables para preservar la función del sistema (Jardine & Tsang, 2014).

RCM puede producir los siguientes beneficios:

- Mejorar la comprensión del equipo: cómo falla y las consecuencias de la falla
- Aclarar los roles que desempeñan los operadores y los mantenedores para hacer que el equipo sea más confiable y menos costoso de operar
- Hacer que el equipo sea más seguro, más ecológico, más productivo, más fácil de mantener y más económico de operar.

2.14. Mantenimiento productivo total TPM

TPM es una metodología centrada en las personas que ha demostrado ser efectiva para optimizar la efectividad del equipo y eliminar averías. Moviliza a los operadores de máquinas para que desempeñen un papel activo en el trabajo de mantenimiento cultivando en estos trabajadores de primera línea un sentido de propiedad de las instalaciones que operan (Campbell 1995) y ampliando sus responsabilidades laborales para incluir el mantenimiento de rutina y la reparación menor de sus máquinas (Campbell, 1995).





CAPITULO III

3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE LA EMPRESA

3.1. Programa de mantenimiento preventivo

La empresa cuenta con un procedimiento de mantenimiento preventivo cuyo objetivo es programar y llevar a cabo el mantenimiento preventivo de los activos para su conservación y óptimo funcionamiento a efecto de proporcionar en forma oportuna y eficiente los servicios que ofrece la empresa a sus clientes.

El programa de mantenimiento solo incluye cambios preventivos dados por el dealer de la marca, como son los cambios de fluidos y filtros de cada sistema del equipo, de acuerdo a la información de los horómetros y kilometrajes.

El alcance del programa de mantenimiento preventivo aplica a los vehículos, equipos y maquinarias propias de la empresa como también a los equipos subcontratados.

3.1.1. Responsabilidades

El supervisor de Mantenimiento coordina y verifica el correcto cumplimiento del procedimiento, con el soporte del área de planeamiento, programación.

3.1.2. Solicitud del mantenimiento

El supervisor de Mantenimiento y Operaciones, al finalizar la jornada laboral informa al Planner de Mantenimiento los horómetros y kilometrajes de los equipos para la actualización en el programa general de mantenimiento preventivo.

La solicitud del programa semanal de mantenimiento preventivo es de responsabilidad del Supervisor de Mantenimiento al área de planeamiento y programación. Toda solicitud es mediante correo electrónico.

3.1.3. Planificación y programación del mantenimiento preventivo

La planificación y programación es de responsabilidad del Planner de Mantenimiento, se encargará de las coordinaciones de cómo y cuándo se ejecutará el mantenimiento y el tipo de servicio preventivo a realizar.

Esto incluye las coordinaciones con el área de logística para la compra de los insumos y repuestos.

Para los equipos que están dentro del periodo de garantía se coordinará con el proveedor del servicio y se le informará anticipadamente el cronograma y se enviará la orden de servicio.

Toda esta información es incluida dentro del cronograma semanal de Mantenimiento Preventivo remitido al Supervisor de Mantenimiento.

3.1.4. Ejecución del mantenimiento preventivo

Para la ejecución del mantenimiento, se seguirá el procedimiento de bloqueo del equipo de acuerdo a los estándares de seguridad del cliente o en su defecto el procedimiento interno de la empresa. Se seguirá la hoja de ruta de acuerdo al tipo de servicio preventivo que se ha planificado y programado.

El personal encargado de la tarea deberá cumplir los estándares de seguridad del cliente o en su defecto los estándares internos de seguridad de la empresa, que incluye uso adecuado de los EPP's (Equipo de protección personal), llenado de ATS (Análisis de trabajo seguro), llenado del IPERC (Identificación de peligros, evaluación de riesgos y control), etc.

3.1.5. Registro del mantenimiento

Toda la documentación del servicio preventivo deberá ser remitido al Planner de Mantenimiento por el Supervisor de Mantenimiento, para la actualización de las bitácoras de mantenimiento físicas y virtuales. Incluye el llenado del check list, OIT (Orden de trabajo interna) y el informe técnico si el caso lo amerita.

Los informes técnicos de servicios por terceros deberán ser visados por el Supervisor de Mantenimiento para la remisión al Planner de Mantenimiento.

3.2. Programa de mantenimiento correctivo

La empresa cuenta con un procedimiento de mantenimiento correctivo cuyo objetivo es coordinar y llevar a cabo el mantenimiento correctivo de los activos de la empresa para su reparación y puesta en funcionamiento en el menor tiempo posible.

El alcance del programa de mantenimiento correctivo aplica a los vehículos, equipos y maquinarias propias de la empresa como también a los equipos subcontratados.

3.2.1. Responsabilidades

El supervisor de Mantenimiento coordina y verifica el correcto cumplimiento del procedimiento, con el soporte del área de planeamiento y programación.

3.2.2. Comunicación de falla o avería

El operador del equipo comunica en primera línea al supervisor de Operaciones y/o Mantenimiento sobre la falla o avería.

Recibida la falla, el supervisor del área de Mantenimiento coordinará con el personal calificado para la primera intervención del equipo, la coordinación es conjunta con el Planner de Mantenimiento.

La primera intervención técnica bajo responsabilidad del supervisor de Operaciones y/o Mantenimiento debe realizarse bajo procedimientos de seguridad del cliente o en su defecto los procedimientos internos de la empresa.

3.2.3. Planificación y programación del mantenimiento correctivo

Si el mantenimiento correctivo requiere repuestos que no se tienen en stock, o algún servicio por parte de terceros, el Planner de Mantenimiento deberá hacer las coordinaciones para la programación y planificación del correctivo.

La programación del mantenimiento correctivo deberá ser incluido en el cronograma semanal de mantenimiento.

Toda la información solicitada es mediante correo electrónico.

3.2.4. Ejecución del mantenimiento preventivo

Para la ejecución del mantenimiento correctivo, se seguirá el procedimiento de bloqueo del equipo de acuerdo a los estándares de seguridad del cliente o en su defecto el procedimiento interno de la empresa.

El personal encargado de la tarea deberá cumplir los estándares de seguridad del cliente o en su defecto los estándares internos de seguridad de la empresa, que incluye uso adecuado de los EPP's (Equipo de protección personal), llenado de ATS (Análisis de trabajo seguro), llenado del IPERC (Identificación de peligros, evaluación de riesgos y control), etc.

3.2.5. Registro del mantenimiento

Toda la documentación del mantenimiento correctivo deberá ser remitido al Planner de Mantenimiento por el Supervisor de Mantenimiento, para la actualización de las bitácoras de mantenimiento físicas y virtuales. Incluye el llenado del check list, OIT (Orden de trabajo interna) y el informe técnico si el caso lo amerita.

Los informes técnicos de servicios por terceros deberán ser visado por el Supervisor de Mantenimiento para la remisión al Planner de Mantenimiento.

3.3. Nomenclatura de la flota de equipo pesado

La empresa cuenta con una flota de equipo pesado con las siguientes características:

1. Cargador frontal sobre ruedas Komatsu, WA470-6.
2. Excavadoras hidráulicas Komatsu PC350LC-8.
3. Tractor de Oruga Komatsu D155AX-6.
4. Volquetes Volvo FMX440 6x4.
5. Volquetes Volvo FMX480 8X4.

Se ha creado la siguiente codificación de los equipos, con la finalidad de salvaguardar la confidencialidad de datos de la empresa:

Figura 15

Nomenclatura de equipos



Fuente: Elaboración propia

3.4. Maestro de equipos

El maestro de equipos es una Tabla creada donde se muestra las características principales de toda la flota de equipo pesado, no se detallan los datos de motor, chasis, placa, seguro vehicular, Soat, revisiones técnicas o algún dato propio del maestro de equipos, con la finalidad de salvaguardar de datos de la empresa.

En la Tabla 2 se muestra la relación de equipos con la codificación de equipo designada de acuerdo a la Figura 15.

Tabla 1
Maestro de equipos

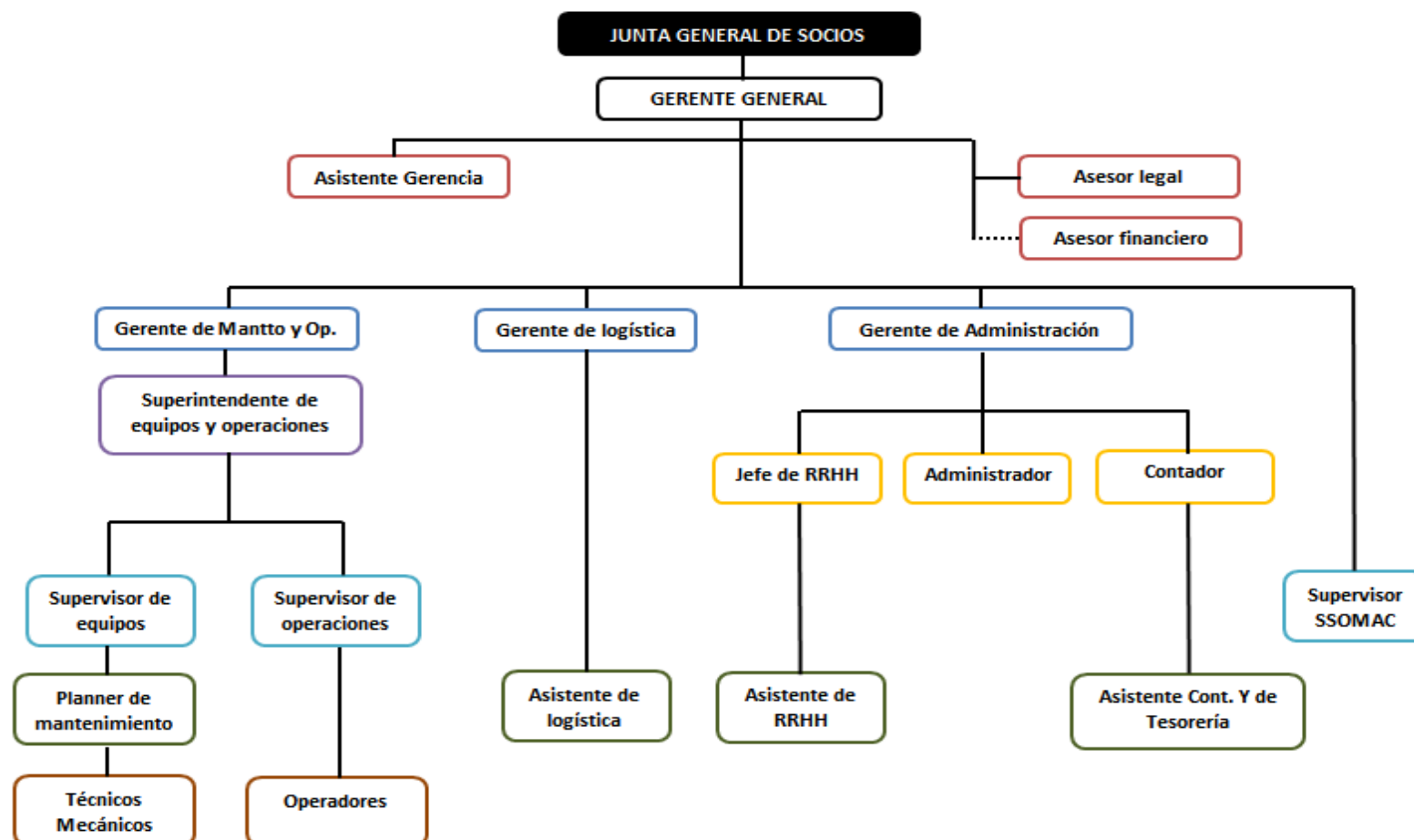
Ítem	Código	Familia	Marca	Modelo	Año	Capacidad	Valor adquisición (us\$)
01	CV-V001	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	186,500.00
02	CV-V002	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	186,500.00
03	CV-V003	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	186,500.00
04	CV-V004	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	186,500.00
05	CV-V005	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	187,258.00
06	CV-V006	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	186,727.00
07	CV-V007	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2013	15 m3	186,727.00
08	CV-V008	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2014	15 m3	175,280.00
09	CV-V009	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2014	15 m3	175,280.00
10	CV-V010	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2014	15 m3	175,280.00
11	CV-V011	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2014	15 m3	175,280.00
12	CV-V012	Camión volquete	Volvo	fmX 440	2014	15 m3	175,280.00
13	CV-V013	Camión volquete	Volvo	fmX 480	2015	20 m3	197,500.00
14	CV-V014	Camión volquete	Volvo	fmX 480	2015	20 m3	197,500.00
15	CV-V015	Camión volquete	Volvo	fmX 480	2015	20 m3	197,500.00
16	CV-V016	Camión volquete	Volvo	fmX 480	2015	20 m3	197,500.00
17	CV-V017	Camión volquete	Volvo	fmX 480	2015	20 m3	197,500.00
18	CF-K001	Cargador frontal	Komatsu	wa470-6a	2013	3.90 m3	389,400.00
19	CF-K002	Cargador frontal	Komatsu	wa470-6a	2013	3.90 m3	403,560.00
20	CF-K003	Cargador frontal	Komatsu	wa470-6a	2014	3.90 m3	403,560.00
21	EX-K001	Excavadora hidráulica	Komatsu	pc-350lc-8	2012	2.50 m3	396,300.00
22	EX-K002	Excavadora hidráulica	Komatsu	pc-350lc-8	2013	2.50 m3	371,100.00
23	EX-K003	Excavadora hidráulica	Komatsu	pc-350lc-8	2013	2.50 m3	395,300.00
24	TR-K001	Tractor de orugas	Komatsu	d155ax-6	2013	9.40 m3	654,900.00

Fuente: Elaboración Propia.

3.5. Organigrama

Figura 16

Organigrama de la empresa



Fuente: Elaboración propia

3.6. Cálculo de KPI's en el área de mantenimiento

El área de mantenimiento usa el indicador de disponibilidad (D%), como medida principal de la eficiencia operacional y mantenimiento. Este indicador forma parte de temas contractuales en alquiler bajo penalizaciones cuando el valor está por debajo de 92%-95% dependiendo el tipo de proyecto.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los indicadores básicos de mantenimiento para el cargador frontal CF-K001, teniendo como datos los mantenimientos correctivos y preventivos desde enero a diciembre del 2022.

A continuación, se muestra los cálculos de los indicadores de mantenimiento como ejemplos para el mes de abril, TPFS, TPO, Disponibilidad Inherente, Disponibilidad mecánica, Disponibilidad física, utilización y frecuencia de fallas. De acuerdo a las fórmulas descritas en el marco teórico.

1. TPO (Tiempo medio operativo hasta la falla)

Tiempo operativo = 189 horas

Número de fallas = 5

$$TPO = \frac{189}{5} = 37.8 \text{ horas}$$

2. TPFS (Tiempo medio fuera de servicio)

Tiempo total de mantenimiento = 12 horas

Número de fallas = 5

$$TPFS = \frac{12}{5} = 2.4 \text{ horas}$$

3. Disponibilidad inherente (Di)

$$D_i(\%) = \frac{TPO}{TPO + TPFS} * 100\%$$

$$D_i(\%) = \frac{37.8}{37.8 + 2.4} * 100\%$$

$$D_i(\%) = 94 \%$$

4. Disponibilidad Mecánica (Dm)

Tiempo total fuera de servicio = Paradas por Mantto correctivo + paradas por Mantto preventivo + tiempo por lubricación

Paradas por Mantto correctivo = 12 horas

Paradas por Mantto preventivo = 1.5 horas

Tiempo por lubricación = 6 horas

Tiempo operativo = 189 horas

$$D_m(\%) = \frac{189 - (12 + 1.5 + 6)}{189} * 100\%$$

$$D_m(\%) = 89.7 \%$$

5. Disponibilidad física (Df)

Tiempo total fuera de servicio = Paradas por Mantto correctivo + paradas por Mantto preventivo + tiempo por lubricación

Paradas por Mantto correctivo = 12 horas

Paradas por Mantto preventivo = 1.5 horas

Tiempo por lubricación = 6 horas

Tiempo disponible = 8 horas x 30 días = 240 horas

$$D_f(\%) = \frac{240 - (12 + 1.5 + 6)}{240} * 100\%$$

$$D_f(\%) = 91.9 \%$$

6. Utilización (U%)

Horas operativas = 189

Horas programadas en el periodo = 240

$$U(\%) = \frac{189}{240} = 78.8\%$$

7. Frecuencia de fallas (FF)

TPO = 37.8

$$FF = \frac{1}{37.8} = 0.026 \text{ Fallas por Hora}$$

Fallas por mes considerando 240 horas de trabajo

$$Fallas \text{ mes} = 0.026 * 240 = 6.3 \text{ fallas}$$

Tabla 2
KPI's cargador frontal CF-K001

Mes (año 2022)	Horas programadas por día	Horas programadas mes	Horómetro inicial	Horómetro final	Horas trabajadas	Número de paradas	Paradas por mantto correctivo	Paradas por mantto preventivo	Paradas por lubricación	TPFS	TPO	FF (hrs)	Disponibilidad inherente (%)	Disponibilidad mecánica (%)	Disponibilidad física (%)	Utilización
Enero	8	240	9085	9284	199	3	9.5	2.5	6	3.2	66.3	0.015	95.44%	90.95%	92.50%	82.92%
Febrero	8	240	9284	9471	187	3	11	0	6	3.7	62.3	0.016	94.44%	90.91%	92.92%	77.92%
Marzo	8	240	9471	9647	176	7	10	2.5	6	1.4	25.1	0.040	94.62%	89.49%	92.29%	73.33%
Abril	8	240	9647	9836	189	5	12	1.5	6	2.4	37.8	0.026	94.03%	89.68%	91.88%	78.75%
Mayo	8	240	9836	10015	179	1	3	2.5	6	3.0	179	0.006	98.35%	93.58%	95.21%	74.58%
Junio	8	240	10015	10198	183	2	6	1	6	3.0	91.5	0.011	96.83%	92.90%	94.58%	76.25%
Julio	8	240	10198	10385	187	7	14	4	6	2.0	26.7	0.037	93.03%	87.17%	90.00%	77.92%
Agosto	8	240	10385	10589	204	5	13.5	2	6	2.7	40.8	0.025	93.79%	89.46%	91.04%	85.00%
Setiembre	8	240	10589	10776	187	6	11	2	6	1.8	31.2	0.032	94.44%	89.84%	92.08%	77.92%
Octubre	8	240	10776	10998	222	3	9.5	0	6	3.2	74.0	0.014	95.90%	93.02%	93.54%	92.50%
Noviembre	8	240	10998	11204	206	3	8	0	6	2.7	68.7	0.015	96.26%	93.20%	94.17%	85.83%
diciembre	8	240	11204	11396	192	2	7	4	6	3.5	96.0	0.010	96.48%	91.15%	92.92%	80.00%
Promedio										2.7	66.6	0.015	95.3%	90.93%	92.7%	80.3%

Fuente: Elaboración Propia.

3.7. Resumen KPI's de toda la flota

Se muestra en la Tabla 3 y 4 el promedio de los indicadores mecánicos para el año 2022 de toda la flota de equipo de movimiento de tierra, siguiendo el cálculo ejemplo del punto anterior.

Tabla 3

Resumen KPI's de la flota por equipos

Item	Código	TPFS	TPO	FF (HRS)	Di (%)	Dm(%)
01	CV-V001	6.7	110	0.009	94.3%	90.4%
02	CV-V002	7.2	160	0.006	95.7%	92.5%
03	CV-V003	4.5	75	0.013	94.3%	91.4%
04	CV-V004	9.5	190	0.005	95.2%	92.6%
05	CV-V005	6.7	96	0.010	93.5%	88.8%
06	CV-V006	8.9	115	0.009	92.8%	89.6%
07	CV-V007	10.2	230	0.004	95.8%	91.6%
08	CV-V008	9.2	101	0.010	91.7%	88.7%
09	CV-V009	5.6	156	0.006	96.5%	92.3%
10	CV-V010	5.5	84	0.012	93.9%	91.0%
11	CV-V011	5.6	114	0.009	95.3%	91.9%
12	CV-V012	6.3	109	0.009	94.5%	91.3%
13	CV-V013	3.9	164	0.006	97.7%	94.6%
14	CV-V014	4.5	92	0.011	95.3%	91.6%
15	CV-V015	3.6	71	0.014	95.2%	92.0%
16	CV-V016	4.8	129	0.008	96.4%	93.5%
17	CV-V017	5.6	106	0.009	95.0%	91.2%
18	CF-K001	2.7	67	0.015	96.1%	91.9%
19	CF-K002	4.5	82	0.012	94.8%	92.2%
20	CF-K003	5.9	75	0.013	92.7%	90.2%
21	EX-K001	3.1	64	0.016	95.4%	92.2%
22	EX-K002	4.6	84	0.012	94.8%	91.7%
23	EX-K003	3.9	100	0.010	96.2%	93.8%
24	TR-K001	3.1	68	0.015	95.6%	92.3%
Promedio		5.7	110	0.010	94.95%	91.6%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4
Resumen KPI'S de la flota por familia

Familia	Prom. TPFS	Prom. TPO	Prom. FF (HRS)	Prom. Di (%)	Prom. Dm (%)
Cargador Frontal	4.4	74.5	0.014	94.5%	91.4%
Excavadora	3.9	82.7	0.013	95.5%	92.5%
Tractor	3.1	68.0	0.015	95.6%	92.3%
Volquete FMX440	7.2	128.3	0.009	94.5%	91.0%
Volquete FMX480	4.5	112.4	0.010	95.9%	92.6%
Promedio	5.7	110.1	0.010	94.95%	91.6%

Fuente: Elaboración Propia.



CAPITULO IV

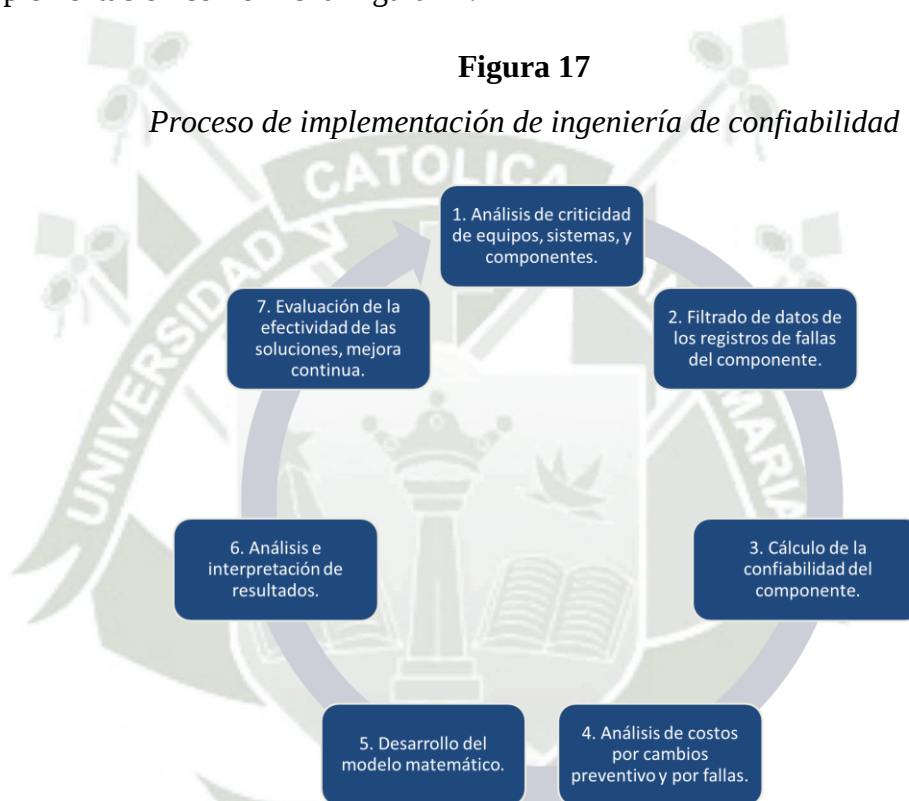
4. IMPLEMENTACIÓN DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

4.1. Proceso de implementación

Para el cambio óptimo de los componentes se ha definido el modelo matemático desarrollado por el Dr. Adrew Jardini catedrático del departamento de ingeniería mecánica e industrial de la universidad de Toronto, en su estudio para la optimización de reemplazo de componentes basados en la confiabilidad. Seguiremos el proceso de implementación conforme la Figura 17.

Figura 17

Proceso de implementación de ingeniería de confiabilidad



Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Cuadro de mando integral e indicadores claves de desempeño

El cuadro de mando integral es un modelo que permite la medición del desempeño de las corporaciones, este modelo aterriza las estrategias y la misión en un conjunto de medidas y objetivos cuantificables mediante KPI's. Todo esto mediante 4 perspectivas: Financieras, Cliente, procesos internos y de aprendizaje y crecimiento. En la Tabla 5 y 6 se muestra la propuesta del cuadro del mando integral para la organización. En la implementación del proyecto nos enfocaremos en optimizar los costos, mejorar la disponibilidad, reducir los tiempos para reparar, mejorar los procesos de mantenimiento y su documentación.

Tabla 5
Cuadro de mando integral perspectiva financiera y hacia los clientes

Objetivos Estratégicos		Medidas	Metas	Perspectiva
Optimizar los costos de mantenimiento	Índice de costo de mantenimiento por horas de operación	$\%ICM = \text{USD Costo de mantenimiento} / \text{hrs de operación}$	< Al presupuesto mensual en curso	Financieros
	% de cumplimiento de presupuesto mensual	$\%CPM = \text{Costo mensual (USD)} / \text{Costo presupuestado (USD)}$	< Al presupuesto mensual en curso	Financieros
Mejorar la disponibilidad de los equipos y reducir los tiempos para reparar	Disponibilidad mecánica (Dm%)	$Dm (\%) = (\text{Tiempo operativo} - \text{Tiempo total fuera de servicio}) / (\text{Tiempo operativo}) * 100\%$	$\geq 92\%$	Clientes
	Disponibilidad Inherente (Di%)	$D (\%) = \text{TPO} / (\text{TPO} + \text{TPFS}) * 100\%$	$\geq 95\%$	Clientes
	Tiempo medio para reparar (TPFS)	$TPFS = (\text{Tiempo total de Mantenimiento}) / (\text{Número de fallas})$	$\leq 4 \text{ Hrs}$	Clientes
	Tiempo medio entre fallas (TPO)	$TPO = (\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo fuera de servicio}) / (\text{Número de fallas})$	$\geq 120 \text{ Hrs}$	Clientes

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6
Cuadro de mando integral perspectiva de procesos internos y aprendizaje

Objetivos Estratégicos	Medidas	Metas	Perspectiva
Mejorar el proceso de mantenimiento y la documentación	Programa y seguimiento del mantenimiento preventivo semanal, mensual y anual	Programación semanal los viernes, mensual la tercera semana del mes y anual en la segunda semana de Diciembre	Procesos internos
	Cumplimiento de la programación semanal de mantenimiento	MP=Tareas de mantenimiento ejecutadas/tareas de mantenimiento programadas PMP%=±desfase de mantenimiento	Procesos internos
	Precisión del mantenimiento preventivo	10%<PMP%<10%	Procesos internos
	Registro de fallas	Revisión semanal	Procesos internos
	Análisis de criticidad de equipos, sistemas y componentes	Semestral	Procesos internos
	Análisis de confiabilidad para la optimización de planes de mantenimiento	Semestral	Procesos internos
Mejorar los niveles de formación y entrenamiento del personal	Capacitación técnica	CT=Horas hombre de entrenamiento/horas hombre programadas	Aprendizaje
	Sensibilización del personal en temas de temas se seguridad, salud y medio ambiente	CSSOMA=Horas hombre de entrenamiento/horas hombre programadas	Aprendizaje

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Priorización de equipos, sistemas y componentes

Para la priorización de los equipos, sistemas y componentes usaremos el diagrama de Jack Knife, a diferencia del diagrama de Pareto que solo usa un solo criterio para priorizar, el diagrama de Jack Knife compara varios criterios a la misma vez.

Representa un diagrama donde se relaciona el TPFS, frecuencia de falla y la indisponibilidad, lo que nos permitirá identificar, clasificar y priorizar en forma visual los equipos, sistemas y componentes con altos TPFS, alta frecuencia de falla y alta indisponibilidad.

De acuerdo a la Tabla 3 y 4 del capítulo III donde se hizo el análisis de la situación actual de mantenimiento de la organización usaremos los datos para generar el diagrama de Jack Knife.

4.3.1. Diagrama de Jack Knife para la priorización de equipos

Para la elaboración del diagrama necesitaremos los promedios de TPFS, frecuencia de fallas e indisponibilidad de toda la flota.

Para el CF-K001 en la Tabla 3 se muestran los promedios del TPFS y frecuencia de fallas, por lo que el porcentaje de indisponibilidad promedio para el Cargador frontal es:

$$\text{TPFS} = 2.7 \text{ Horas}$$

$$\lambda = 0.015$$

$$ID\% = 0.015 * 2.7 = 4.1\%$$

Donde λ es la frecuencia de fallas.

Siguiendo el mismo procedimiento de acuerdo a la Tabla 3 donde se muestra el resumen de KPI's de toda la flota, hallamos el porcentaje de indisponibilidad para cada equipo. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7
TPFS, FF e ID% promedio de toda la flota

Ítem	Código	TPFS	FF (HRS)	ID (%)
01	CV-V001	6.7	0.009	6.1%
02	CV-V002	7.2	0.006	4.5%
03	CV-V003	4.5	0.013	6.0%
04	CV-V004	9.5	0.005	5.0%
05	CV-V005	6.7	0.010	7.0%
06	CV-V006	8.9	0.009	7.7%
07	CV-V007	10.2	0.004	4.4%
08	CV-V008	9.2	0.010	9.1%
09	CV-V009	5.6	0.006	3.6%
10	CV-V010	5.5	0.012	6.5%
11	CV-V011	5.6	0.009	4.9%
12	CV-V012	6.3	0.009	5.8%
13	CV-V013	3.9	0.006	2.4%
14	CV-V014	4.5	0.011	4.9%
15	CV-V015	3.6	0.014	5.1%
16	CV-V016	4.8	0.008	3.7%
17	CV-V017	5.6	0.009	5.3%
18	CF-K001	2.7	0.015	4.1%
19	CF-K002	4.5	0.012	5.5%
20	CF-K003	5.9	0.013	7.9%
21	EX-K001	3.1	0.016	4.8%
22	EX-K002	4.6	0.012	5.5%
23	EX-K003	3.9	0.010	3.9%
24	TR-K001	3.1	0.015	4.6%
Promedio		5.7	0.010	5.3%

Fuente: Elaboración Propia.

De esta manera tenemos los promedios del TPFS, FF e ID%, que serán graficados como ISO para el análisis de criticidad.

TPFS Promedio = 5.7 Hrs

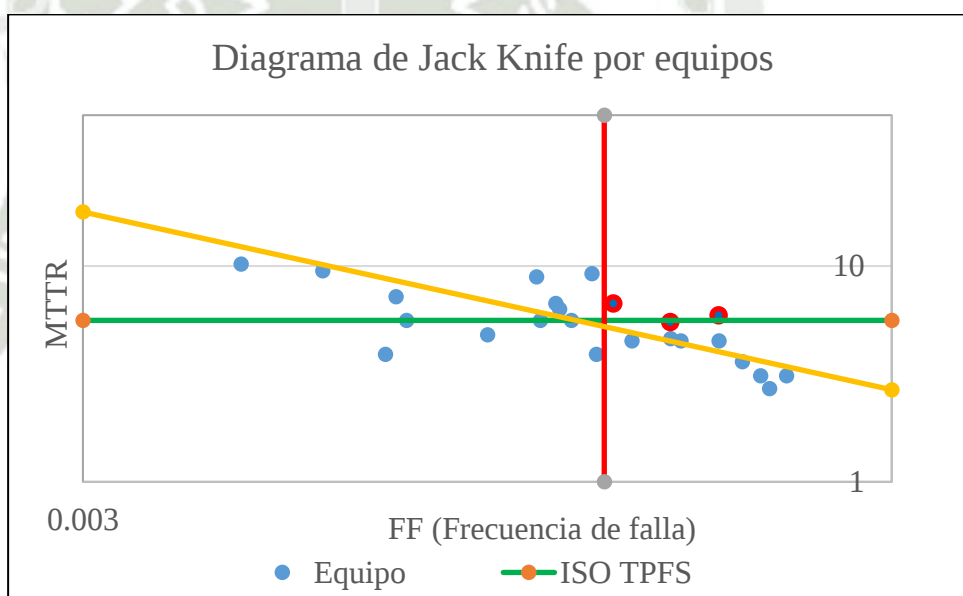
FF Promedio = 0.010 fallas/hrs

ID% promedio = 5.3%

Con los datos obtenidos realizamos el gráfico de Jack Knife de toda la flota, el resultado se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Diagrama de Jack Knife para la priorización de equipos



Fuente: Elaboración Propia.

Del gráfico se observa que los equipos con mayor TPFS, FF e ID%, corresponden al Cargador frontal Komatsu CF-K003 y los camiones volquete FMX440 CV-V010 y CV-V005.

4.3.2. Diagrama de Jack Knife para la priorización de sistemas

En el punto anterior se halló los equipos con mayor criticidad, de acuerdo a esta información se hizo el filtrado y análisis de los sistemas con mayor recurrencia de fallas para el cargador frontal CF-K003 y camión volquete CV-V005. Hallando el TPFS, FF e ID%.

Se muestra como ejemplo el cálculo de los indicadores para el sistema hidráulico del cargador frontal CF-K003, corresponden al histórico de fallas del año 2022.

fallas = 19; Horas por correctivos = 178 hrs; horas operativas = 1298 hrs.

$$TPFS = \frac{178}{19} = 9.4 \text{ horas}$$

$$TPO = \frac{1298}{19} = 68.3 \text{ horas}$$

$$FF = \frac{1}{68.3} = 0.015$$

$$Di\% = \frac{68.3}{68.3 + 9.4} * 100 = 87.9\%$$

$$ID\% = 9.4 * 0.015 * 100 = 13.7\%$$

Siguiendo el cálculo ejemplo para el sistema hyd, en las Tablas 8 se muestra el resumen de los indicadores por sistemas del cargador frontal CF-K003. Con esa información podemos realizar el diagrama de Jack Knife para priorizar los sistemas a desarrollar.

Tabla 8

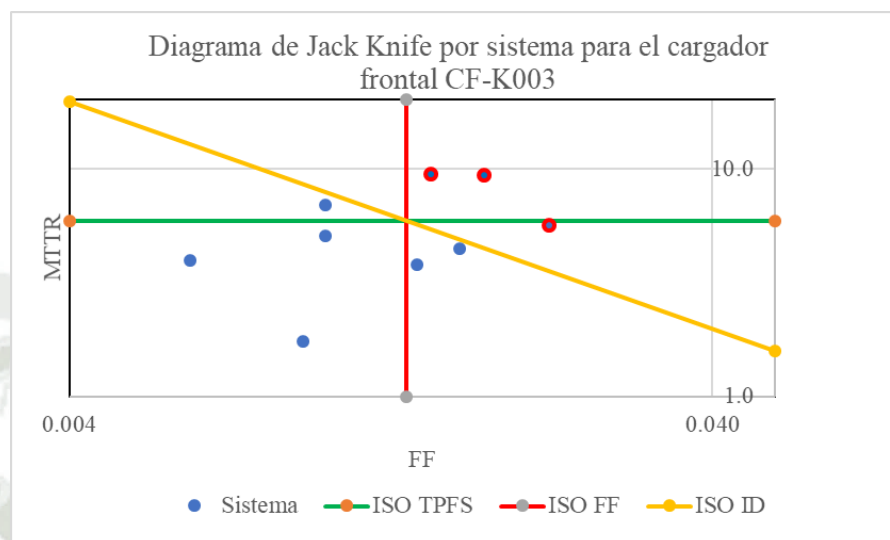
KPI's por sistemas del cargador frontal CF-K003

Sistema	#Fallas	Horas por correctivos	TPFS	TPO	FF (HRS)	Di (%)	ID (%)
A/C	12	21	1.8	108.2	0.009	98.4%	1.6%
Bucket	23	213	9.3	56.4	0.018	85.9%	16.4%
Combustible	18	68.4	3.8	72.1	0.014	95.0%	5.3%
Eléctrico	29	162	5.6	44.8	0.022	88.9%	12.5%
Hidráulico	19	178	9.4	68.3	0.015	87.9%	13.7%
Motor	13	65.6	5.0	99.8	0.010	95.2%	5.1%
Neumáticos	8	31.6	4.0	162.3	0.006	97.6%	2.4%
Refrigeración	21	93.1	4.4	61.8	0.016	93.3%	7.2%
Transmisión	13	90.2	6.9	99.8	0.010	93.5%	6.9%
Total	156	Promedio	5.9	74.9	0.013	92.7%	7.9%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 19

Diagrama de Jack Knife por sistema para el cargador frontal CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 19 se observa que los sistemas con mayor TPFS, FF e ID%, corresponden al sistema Eléctrico, Bucket e hidráulico.

Tabla 9

KPI's por sistemas del camión volquete CV-V005

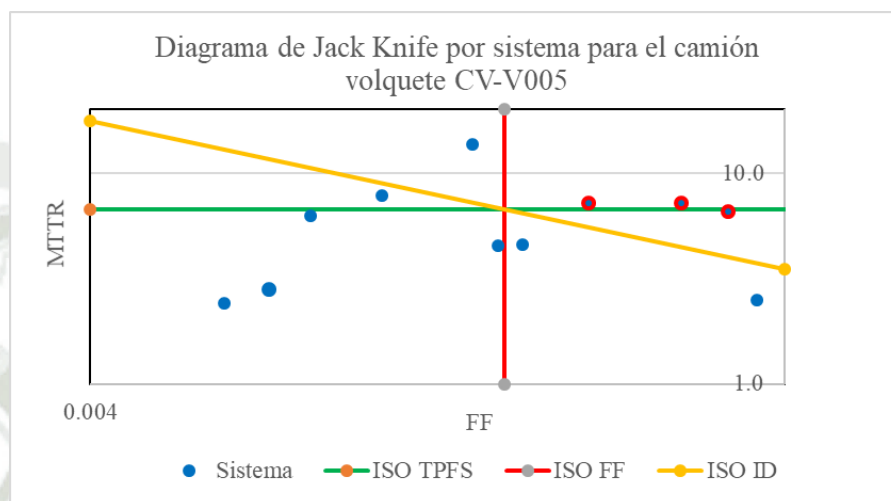
Sistema	#Fallas	Horas por correctivos	TPFS	TPO	FF (HRS)	Di (%)	ID (%)
A/C	9	21.7	2.4	183.6	0.005	98.7%	1.3%
Cabina	17	76.5	4.5	97.2	0.010	95.6%	4.6%
Combustible	13	101.2	7.8	127.1	0.008	94.2%	6.1%
Dirección	10	28	2.8	165.2	0.006	98.3%	1.7%
Eléctrico	29	190.4	6.6	57.0	0.018	89.7%	11.5%
Motor	26	187.2	7.2	63.5	0.016	89.8%	11.3%
Neumática	18	82.8	4.6	91.8	0.011	95.2%	5.0%
Neumáticos	31	77.5	2.5	53.3	0.019	95.5%	4.7%
Refrigeración	21	151	7.2	78.7	0.013	91.6%	9.1%
Suspensión	16	218	13.6	103.3	0.010	88.3%	13.2%
Tolva	11	69.3	6.3	150.2	0.007	96.0%	4.2%
Transmisión	6	92	15.3	275.3	0.004	94.7%	5.6%
Total	207	Promedio	6.7	95.8	0.010	93.4%	7.0%

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 9 se muestra el resumen de los indicadores por sistemas para el camión volquete CV-V005.

Figura 20

Diagrama de Jack Knife por sistema para el camión volquete CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 20 se observa que los sistemas con mayor TPFS, FF e ID%, corresponden al sistema Eléctrico, refrigeración y Motor.

4.3.3. Priorización por componentes.

Para la priorización por componentes se usará el diagrama de Pareto de acuerdo a la criticidad de los sistemas analizados en el punto anterior. No se utilizará el diagrama de Jack Knife debido a que necesitamos la frecuencia ocurrencia de fallas en el ciclo de vida del equipo.

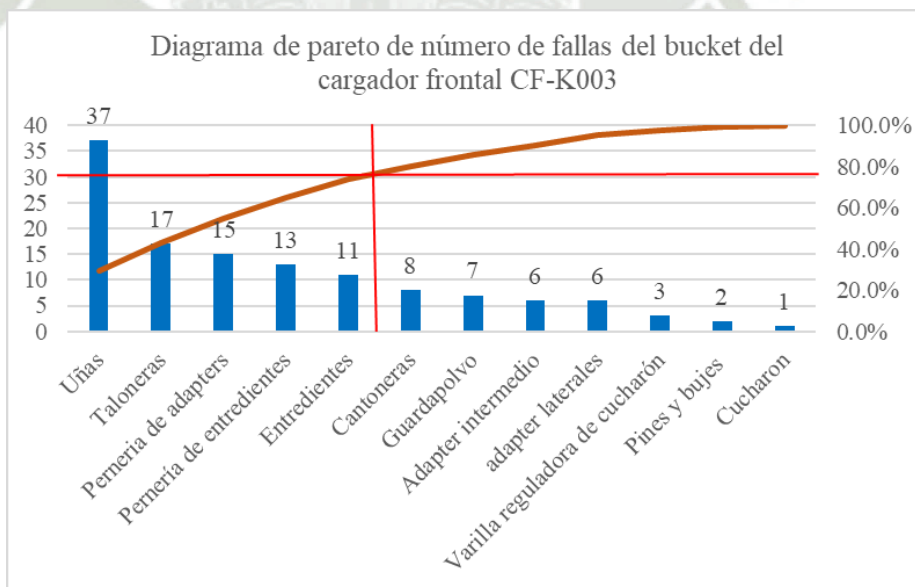
En la Figura 21 y Tabla 10 se muestra las ocurrencias de fallas para el Bucket del cargador frontal CF-K003, por lo que concluimos que las fallas más representativas en el diagrama de Pareto corresponden a:

- Uñas
- Taloneras
- Pernería de los adaptadores
- Pernería de los entre dientes
- Entre dientes

Tabla 10
Número de fallas para el cargador frontal CF-K003

Componentes	#Fallas	% Acumulado
Uñas	37	29.4%
Taloneras	17	42.9%
Pernería de adaptadores	15	54.8%
Pernería de entredientes	13	65.1%
Entredientes	11	73.8%
Cantoneras	8	80.2%
Guardapolvo	7	85.7%
Adapter intermedio	6	90.5%
Adapter laterales	6	95.2%
Varilla reguladora de cucharón	3	97.6%
Pines y bujes	2	99.2%
Cucharon	1	100.0%
Total	126	

Fuente: Elaboración Propia.

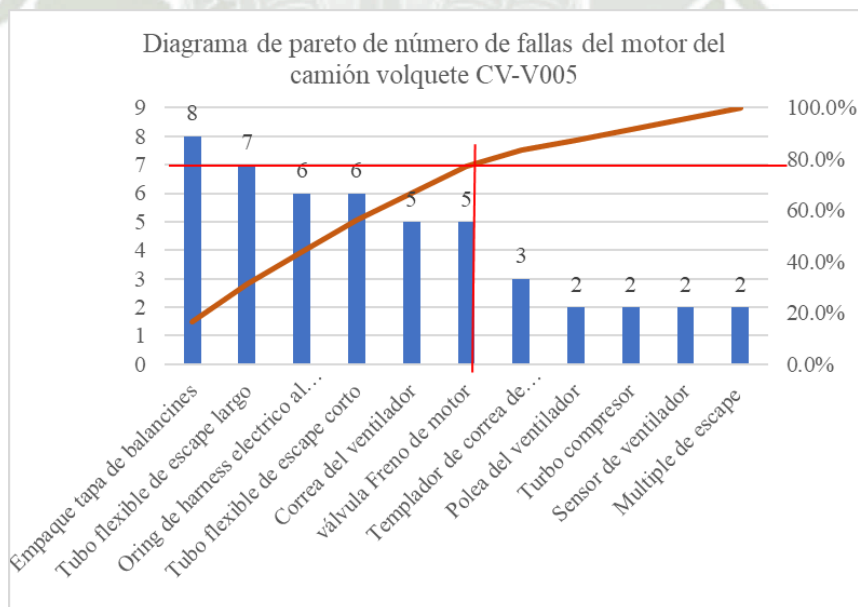
Figura 21
Diagrama Pareto número de fallas del bucket del cargador frontal CF-K003


Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 11
Número de fallas para el motor del camión volquete CV-V005

Componentes	#Fallas	% Acumulado
Empaque tapa de balancines	8	16.7%
Tubo flexible de escape largo	7	31.3%
Oring de harness eléctrico al motor	6	43.8%
Tubo flexible de escape corto	6	56.3%
Correa del ventilador	5	66.7%
Válvula Freno de motor	5	77.1%
Templador de correa de ventilador	3	83.3%
Polea del ventilador	2	87.5%
Turbo compresor	2	91.7%
Sensor de ventilador	2	95.8%
Múltiple de escape	2	100.0%
Total	48	

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 22
Diagrama Pareto número de fallas del motor del camión volquete CV-V005


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 22 y Tabla 11 se muestra las ocurrencias de fallas para el motor del camión volquete CV-V005, por lo que concluimos que las fallas más representativas en el diagrama de Pareto corresponden a:

- Empaque de tapa de balancines
- Tubo Flexible de escape largo
- Oring del harness eléctrico al motor
- Tubo flexible de escape corto
- Correa del ventilador
- Válvula de freno de motor

4.4. Filtrado de datos de los registros de falla del componente

4.4.1. Cargador frontal Komatsu WA470-6

En las Tablas del 12 al 16 se muestran los datos de falla del cambio de componentes del cargador frontal, los datos de fallas están colocados con “0” y los datos censurados están colocados con el número 1.

Tabla 12

Datos de falla de uñas del cargador frontal CF-K003

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	505	1
2	421	0
3	512	1
4	468	0
5	417	0
6	399	0
7	444	0
8	433	0
9	476	0
10	400	1
11	402	0
12	430	0
13	497	1
14	484	0
15	403	0
16	408	0
17	503	1

18	436	0
19	454	0
20	483	0
21	481	0
22	514	1
23	443	0
24	501	0
25	512	0
26	411	0
27	467	0
28	420	0
29	444	0
30	488	0
31	433	0
32	492	1
33	430	0
34	503	0
35	391	0
36	406	0
37	428	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13

Datos de falla de taloneras del cargador frontal CF-K003

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	1029	0
2	997	0
3	1100	0
4	962	0
5	1359	1
6	960	0
7	1281	0
8	1184	0
9	1028	0
10	1075	0
11	1290	0
12	1260	1
13	1160	0

14	1158	0
15	1316	0
16	1258	0
17	972	0
18	1332	0
19	952	0
20	1072	0
21	961	0
22	1063	0
23	1364	1
24	1032	0
25	1102	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 14

Datos de falla pernería de adaptadores del cargador frontal CF-K003

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	1242	0
2	1457	0
3	1351	0
4	1230	0
5	1739	0
6	1506	0
7	1602	0
8	1482	0
9	1505	0
10	1426	0
11	1516	0
12	1396	0
13	1252	0
14	1733	0
15	1776	0
16	1247	0
17	1857	1
18	1738	0
19	1893	1
20	1695	0
21	1257	0
22	1702	0
23	1575	0

24	1533	0
25	1552	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15

Datos de falla pernería de entredientes del cargador frontal CF-K003

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	1547	1
2	1344	0
3	1442	0
4	1408	0
5	1457	0
6	1174	0
7	1530	1
8	1297	0
9	1102	0
10	1510	0
11	1213	0
12	1067	0
13	1453	1
14	1439	0
15	1525	0
16	1326	0
17	1546	0
18	1124	0
19	1503	0
20	1376	0
21	1259	0
22	1411	1
23	1272	0
24	1379	0
25	1220	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 16
Datos de falla de entredientes del cargador frontal CF-K003

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	1950	0
2	2300	0
3	2468	0
4	2108	0
5	1906	0
6	2164	0
7	1924	0
8	2219	0
9	2550	0
10	1985	0
11	1990	0
12	2142	0
13	2080	0
14	2395	0
15	2029	0
16	2295	0
17	2368	0
18	2046	0
19	2193	0
20	1971	0
21	1909	0
22	2490	0
23	2079	0
24	2644	1
25	2218	0

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2. Camión volquete Volvo FMX440

En las Tablas del 17 al 21 se muestran los datos de falla del cambio de componentes del camión volquete, los datos de fallas están colocados con “0” y los datos censurados están colocados con el número 1.

Debido a la poca data de la información de falla del componente, se ha hecho la revisión del historial de falla de todos los camiones volquete del mismo modelo y área de operación.

Tabla 17

Datos de falla del empaque tapa de balancines del volquete CV-V005

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	2515	0
2	2449	0
3	2468	0
4	2404	0
5	2336	0
6	2295	0
7	2550	0
8	2085	0
9	2154	0
10	2080	0
11	2376	0
12	2445	0
13	2411	0
14	2329	0
15	2567	0
16	2505	0
17	2150	0
18	2079	0
19	2553	0
20	2285	0
21	2038	0
22	2690	0
23	2210	0
24	2641	0
25	2550	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 18

Datos de falla tubo de escape flexible largo del volquete CV-V005

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	2735	0
2	2962	0
3	3026	0
4	2887	0
5	2779	0

6	3294	0
7	2787	0
8	2646	0
9	2768	0
10	2984	0
11	3083	0
12	2838	0
13	3223	0
14	2857	0
15	3037	0
16	2760	0
17	2667	0
18	2729	0
19	2836	0
20	3313	0
21	2982	0
22	2761	0
23	3127	0
24	3180	0
25	2720	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 19

Datos de falla tubo de escape flexible corto del volquete CV-V005

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	3436	0
2	3585	0
3	2854	0
4	3204	0
5	3665	0
6	3416	0
7	3667	0
8	3143	0
9	3316	0
10	3759	0
11	2966	0
12	3306	0
13	2875	0
14	2950	0
15	3758	0

16	2807	0
17	3025	0
18	3280	0
19	3247	0
20	3085	0
21	3479	0
22	3221	0
23	3138	0
24	3072	0
25	3779	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 20

Datos de falla correa de ventilador del volquete CV-V005

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	6334	0
2	6369	0
3	6169	0
4	5877	0
5	5788	0
6	6159	1
7	6078	0
8	6009	0
9	5732	0
10	6124	0
11	6098	0
12	6699	1
13	5874	0
14	6287	0
15	5846	0
16	6377	0
17	6315	1
18	5818	0

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 21

Datos de falla válvula freno de motor del volquete CV-V005

No.	Tiempo de falla	Censurado
1	4921	0
2	5506	0
3	5096	0
4	5072	0
5	5578	0
6	4921	0
7	5120	0
8	5414	0
9	5675	0
10	5831	0
11	5076	0
12	5554	0
13	5114	0
14	5186	0
15	5818	0
16	5634	0
17	5619	0
18	5282	0
19	5797	0
20	5579	0
21	5058	0
22	5159	0
23	5761	0
24	5698	0
25	5486	0

Fuente: Elaboración Propia.

4.5. Cálculo de confiabilidad de componentes

4.5.1. Uñas del cargador Frontal Komatsu WA470-6

De acuerdo a la Tabla 12, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 23

Parámetros de la distribución Weibull uñas del CF-K003

Cálculos del parámetro

Parámetro	Estimación estándar	Error IC normal de 95.0%		
		Inferior	Superior	
Forma	11.2837	1.65663	8.46220	15.0460
Escala	477.130	7.77736	462.128	492.620

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 23 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para las uñas del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

Figura 24

Características de la distribución Weibull uñas del CF-K003

Características de distribución

	Estimación estándar	Error IC normal de 95.0%		
		Inferior	Superior	
Media(MTTF)	456.154	8.17414	440.411	472.460
Desviación estándar	48.9509	6.49201	37.7461	63.4819
Mediana	461.881	8.09637	446.282	478.026
Primer cuartil(Q1)	427.252	10.3998	407.347	448.129
Tercer cuartil(Q3)	491.144	8.02507	475.664	507.127
Rango intercuartil(IQR)	63.8918	8.94717	48.5563	84.0706

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 24 se muestran las características de la distribución de Weibull para las uñas del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

En la Tabla 22 y Figura 25 se muestran la probabilidad de falla en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 367 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 337 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 22

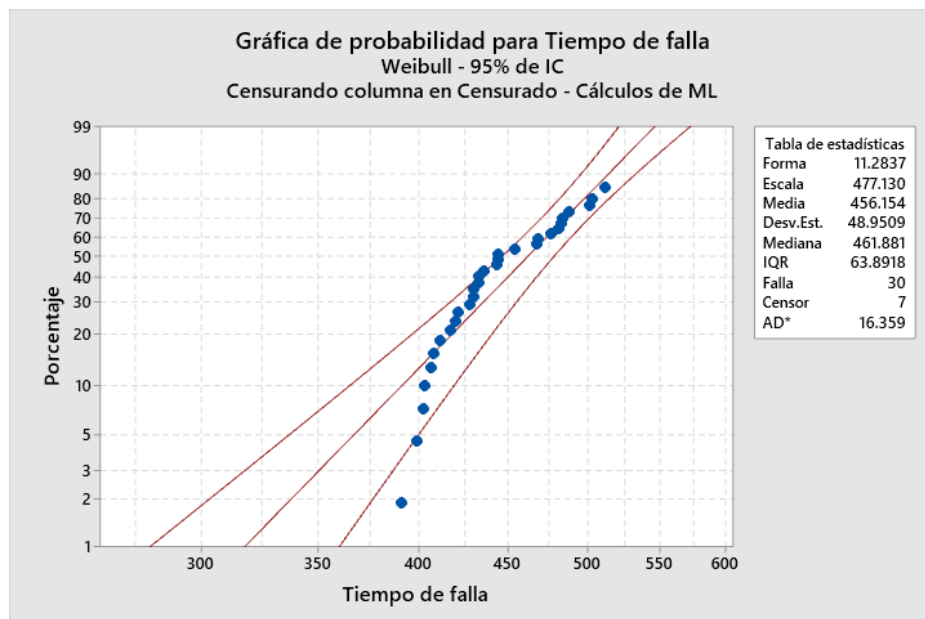
Probabilidad de falla de las uñas cargador frontal CF-K003

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	317.4	20.3	280.0	359.7
2	337.6	18.6	303.0	376.2
3	350.2	17.5	317.4	386.3
4	359.4	16.7	328.1	393.6
5	366.7	16.0	336.6	399.5
6	372.9	15.5	343.7	404.4
7	378.2	15.0	349.9	408.7
8	382.8	14.5	355.4	412.4
9	387.0	14.1	360.3	415.7
10	390.9	13.8	364.8	418.8
20	417.7	11.2	396.3	440.4
30	435.5	9.7	416.8	455.0
40	449.6	8.7	432.8	467.0
50	461.9	8.1	446.3	478.0
60	473.4	7.8	458.4	489.0
70	485.0	7.9	469.9	500.7
80	497.7	8.3	481.6	514.3
90	513.7	9.5	495.5	532.7
91	515.8	9.7	497.2	535.1
92	518.0	9.9	499.0	537.7
93	520.3	10.1	500.9	540.5
94	522.9	10.4	503.0	543.7
95	525.9	10.7	505.3	547.2
96	529.2	11.1	508.0	551.3
97	533.2	11.5	511.1	556.3
98	538.4	12.2	515.1	562.8
99	546.3	13.1	521.1	572.7

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 25

Probabilidad de falla de las uñas del CF-K003

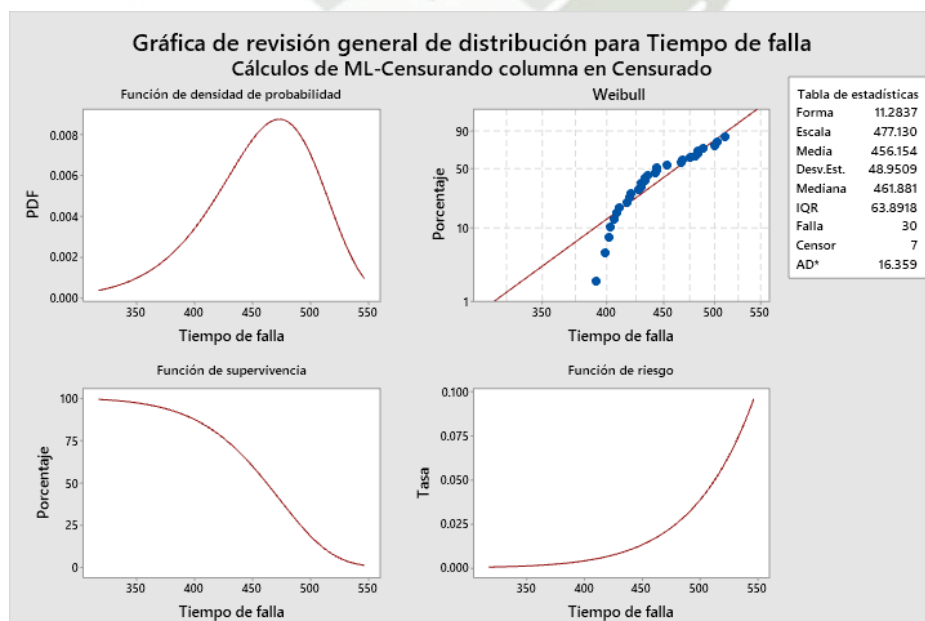


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 26 se muestra la revisión general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 26

Revisión general de la distribución de falla de las uñas del CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.2. Taloneras del cargador frontal Komatsu WA470-6

De acuerdo a la Tabla 13, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 27

Parámetros de la distribución Weibull taloneras del CF-K003

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	7.92458	1.33493	5.69624	11.0246
Escala	1205.46	33.0786	1142.34	1272.07

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 27 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para las taloneras del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

Figura 28

Características de la distribución Weibull taloneras del CF-K003

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	1134.71	34.2193	1069.59	1203.80
Desviación estándar	169.853	24.8381	127.526	226.228
Mediana	1150.98	34.4880	1085.33	1220.60
Primer cuartil(Q1)	1030.09	42.9745	949.212	1117.86
Tercer cuartil(Q3)	1256.19	33.8516	1191.56	1324.32
Rango intercuartil(IQR)	226.100	35.3099	166.483	307.066

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 28 se muestran las características de la distribución de Weibull para las taloneras del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

En la Tabla 23 y Figura 29 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 829 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 717 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 23

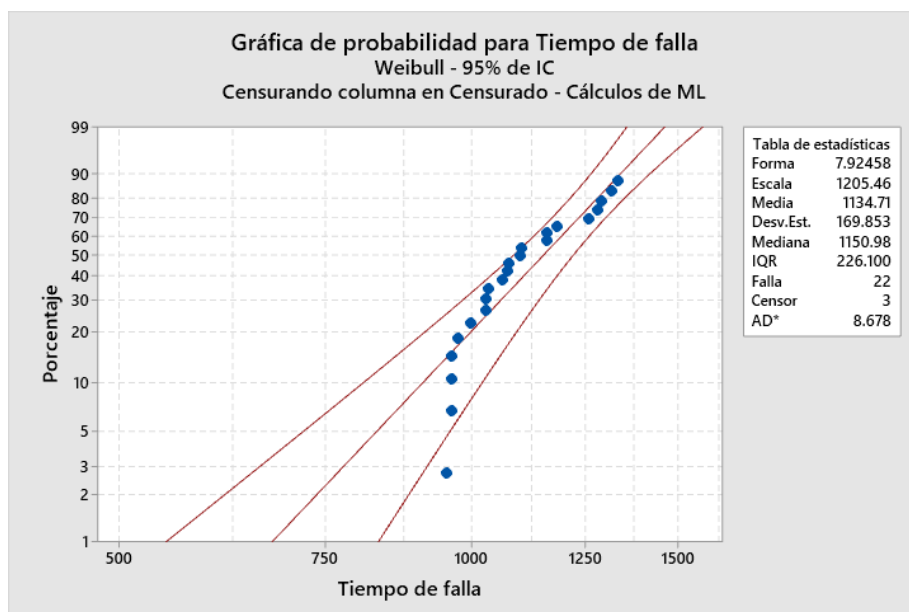
Probabilidad de falla de las taloneras cargador frontal CF-K003

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	674.6	71.9	547.4	831.4
2	736.7	68.0	614.8	882.9
3	775.9	65.2	658.1	914.9
4	805.1	62.9	690.8	938.4
5	828.7	61.0	717.3	957.3
6	848.5	59.3	739.8	973.2
7	865.8	57.8	759.5	986.9
8	881.1	56.5	777.0	999.1
9	894.9	55.3	792.8	1010.0
10	907.5	54.1	807.3	1020.0
20	997.6	45.9	911.6	1091.7
30	1058.4	40.6	981.8	1141.0
40	1107.5	36.9	1037.5	1182.3
50	1151.0	34.5	1085.3	1220.6
60	1192.2	33.2	1128.9	1259.2
70	1234.0	33.2	1170.6	1301.0
80	1280.1	35.0	1213.4	1350.5
90	1339.3	39.6	1263.8	1419.2
91	1346.8	40.4	1269.9	1428.4
92	1355.0	41.3	1276.4	1438.4
93	1363.8	42.3	1283.4	1449.2
94	1373.5	43.4	1291.0	1461.3
95	1384.5	44.8	1299.5	1475.0
96	1397.1	46.4	1309.1	1491.0
97	1412.3	48.4	1320.4	1510.4
98	1431.9	51.2	1334.9	1535.9
99	1461.7	55.8	1356.3	1575.2

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 29

Probabilidad de falla de las taloneras del CF-K003

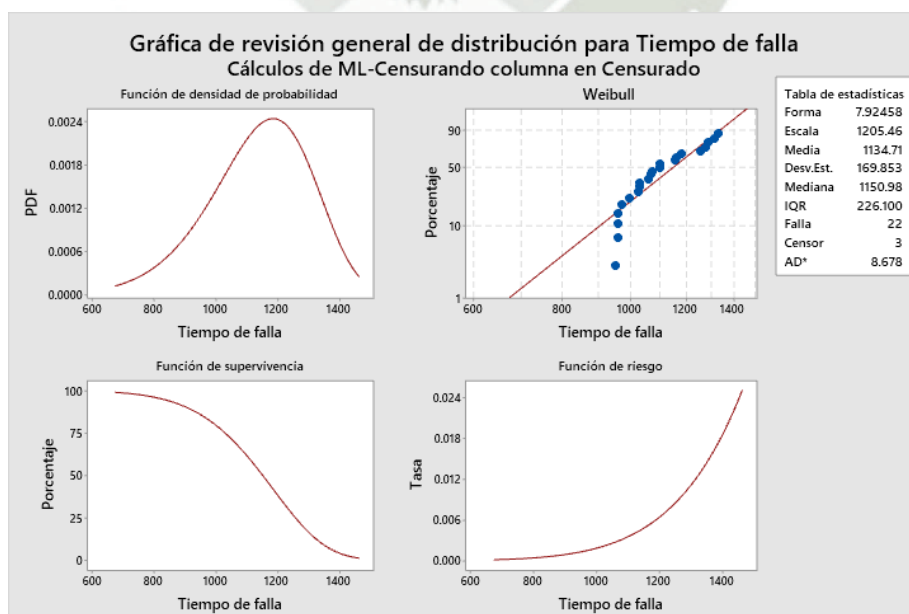


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 29 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 30

Revisión de la distribución de falla de las taloneras del CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.3. Pernería adapters cargador frontal Komatsu WA470-6

De acuerdo a la Tabla 14, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 31

Parámetros de la distribución de Weibull pernería adapters del CF-K003

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	7.91676	1.30387	5.73267	10.9330
Escala	1627.07	44.0710	1542.95	1715.78

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 31 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para la pernería de los adapters del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

Figura 32

Características de la distribución de Weibull pernería adapters del CF-K003

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	1531.50	45.9464	1444.04	1624.25
Desviación estándar	229.458	32.5704	173.732	303.059
Mediana	1553.46	46.2968	1465.32	1646.90
Primer cuartil(Q1)	1390.14	57.8725	1281.22	1508.33
Tercer cuartil(Q3)	1695.60	44.6667	1610.28	1785.45
Rango intercuartil(IQR)	305.462	46.3265	226.916	411.198

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 32 se muestran las características de la distribución de Weibull para la pernería de los adapters del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

En la Tabla 24 y Figura 33 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 1118 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 969 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 24

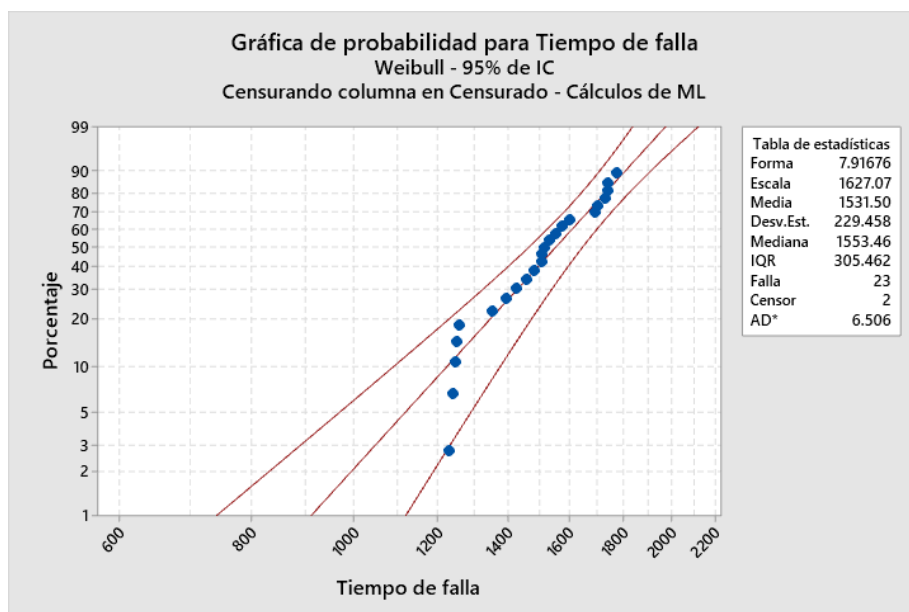
Probabilidad de falla de pernería adapters cargador frontal CF-K003

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	910.0	95.9	740.2	1118.8
2	993.9	90.8	831.0	1188.9
3	1046.8	87.1	889.3	1232.3
4	1086.3	84.2	933.2	1264.4
5	1118.1	81.6	969.0	1290.1
6	1144.9	79.5	999.3	1311.7
7	1168.2	77.5	1025.7	1330.4
8	1188.8	75.7	1049.3	1346.9
9	1207.5	74.1	1070.6	1361.8
10	1224.5	72.6	1090.1	1375.4
20	1346.2	61.7	1230.6	1472.8
30	1428.4	54.7	1325.2	1539.7
40	1494.7	49.7	1400.4	1595.4
50	1553.5	46.3	1465.3	1646.9
60	1609.2	44.4	1524.6	1698.5
70	1665.7	44.1	1581.5	1754.3
80	1727.9	45.9	1640.2	1820.3
90	1807.8	51.6	1709.4	1911.9
91	1818.1	52.6	1717.9	1924.1
92	1829.1	53.7	1726.8	1937.4
93	1841.0	54.9	1736.4	1951.9
94	1854.2	56.4	1746.9	1968.0
95	1868.9	58.1	1758.5	1986.3
96	1886.0	60.2	1771.7	2007.7
97	1906.5	62.8	1787.3	2033.6
98	1933.0	66.4	1807.1	2067.7
99	1973.3	72.3	1836.6	2120.1

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 33

Probabilidad de falla pernería adapters del CF-K003

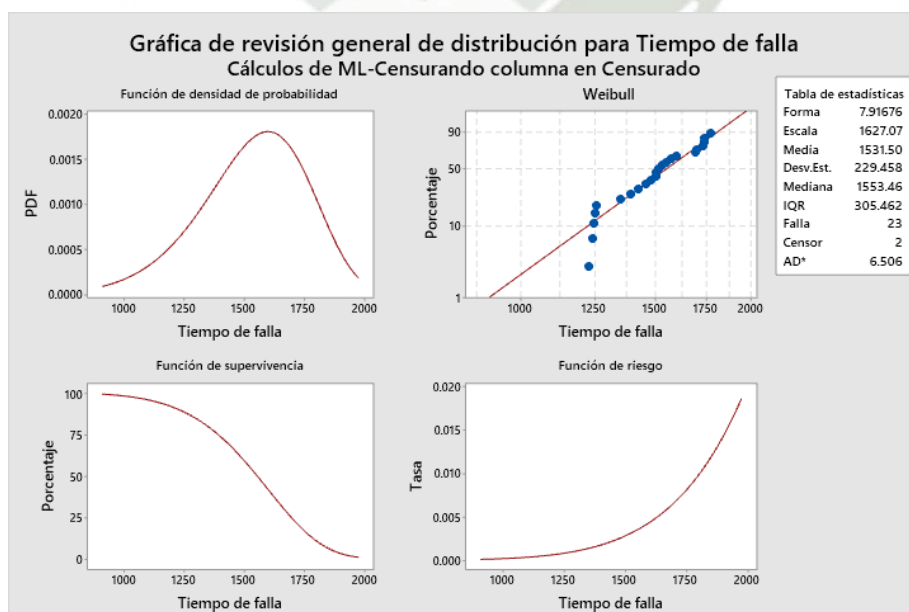


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 34 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 34

Revisión general de la distribución de falla pernería adapters del CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.4. Pernería entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6

De acuerdo a la Tabla 15, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 35

Parámetros de la distribución Weibull pernería de entredientes del CF-K003

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	10.2916	1.86815	7.21057	14.6891
Escala	1437.17	30.7487	1378.15	1498.72

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 35 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para la pernería de los entre dientes del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

Figura 36

Características de la distribución Weibull pernería entredientes del CF-K003

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	1368.90	32.3314	1306.98	1433.76
Desviación estándar	160.281	26.0598	116.543	220.434
Mediana	1386.89	32.1237	1325.34	1451.30
Primer cuartil(Q1)	1273.31	41.5783	1194.37	1357.46
Tercer cuartil(Q3)	1483.51	31.7493	1422.57	1547.07
Rango intercuartil(IQR)	210.210	36.2025	149.988	294.610

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 36 se muestran las características de la distribución de Weibull para la pernería de los entre dientes del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

En la Tabla 25 y Figura 37 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 1078 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 960 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 25

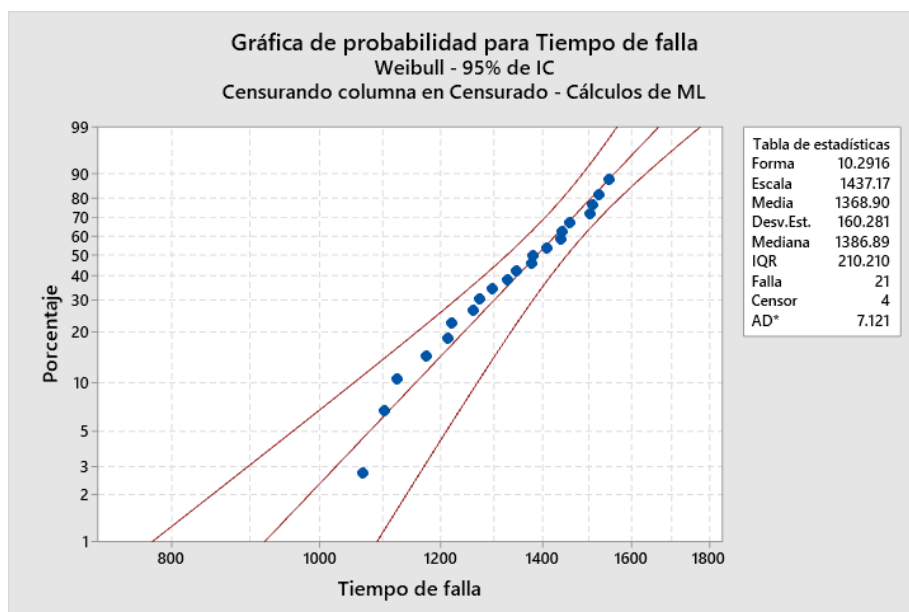
Probabilidad de falla pernería entredientes cargador frontal CF-K003

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	919.2	79.6	775.6	1089.3
2	983.7	73.5	849.6	1138.9
3	1023.7	69.4	896.3	1169.3
4	1053.3	66.3	931.0	1191.6
5	1076.9	63.7	959.0	1209.3
6	1096.7	61.5	982.5	1224.2
7	1113.8	59.6	1002.9	1237.0
8	1128.9	57.9	1021.0	1248.3
9	1142.5	56.3	1037.3	1258.4
10	1154.9	54.9	1052.2	1267.7
20	1242.3	44.9	1157.2	1333.5
30	1300.2	38.8	1226.2	1378.6
40	1346.4	34.7	1280.0	1416.2
50	1386.9	32.1	1325.3	1451.3
60	1425.0	30.9	1365.8	1486.8
70	1463.3	31.0	1403.8	1525.4
80	1505.2	33.0	1441.9	1571.2
90	1558.5	37.9	1486.0	1634.5
91	1565.3	38.6	1491.4	1642.9
92	1572.6	39.5	1497.0	1652.0
93	1580.5	40.5	1503.0	1661.9
94	1589.1	41.6	1509.6	1672.9
95	1598.9	43.0	1516.9	1685.3
96	1610.1	44.5	1525.1	1699.8
97	1623.5	46.5	1534.8	1717.3
98	1640.9	49.2	1547.2	1740.2
99	1667.1	53.5	1565.5	1775.3

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 37

Probabilidad de falla pernería entredientes del CF-K003

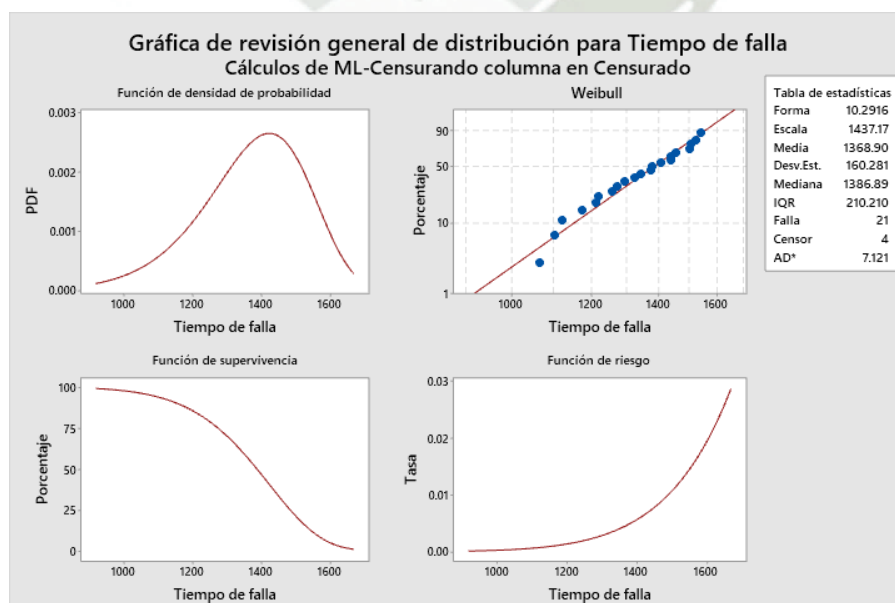


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 38 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 38

Revisión general distribución de falla pernería entredientes del CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.5. Entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6

De acuerdo a la Tabla 16, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 39

Parámetros de la distribución Weibull entredientes del CF-K003

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	9.98152	1.52024	7.40549	13.4536
Escala	2280.18	48.7614	2186.58	2377.78

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 39 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para los entredientes del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

Figura 40

Características de la distribución Weibull entredientes del CF-K003

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	2169.08	52.2333	2069.08	2273.91
Desviación estándar	261.419	34.6804	201.565	339.046
Mediana	2197.97	51.9453	2098.48	2302.18
Primer cuartil(Q1)	2012.61	65.4173	1888.40	2145.00
Tercer cuartil(Q3)	2356.03	48.2740	2263.29	2452.57
Rango intercuartil(IQR)	343.418	48.3693	260.576	452.597

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 40 se muestran las características de la distribución de Weibull para los entredientes del bucket del cargador frontal Komatsu CF-K003.

En la Tabla 26 y Figura 41 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 1693 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 1518 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 26

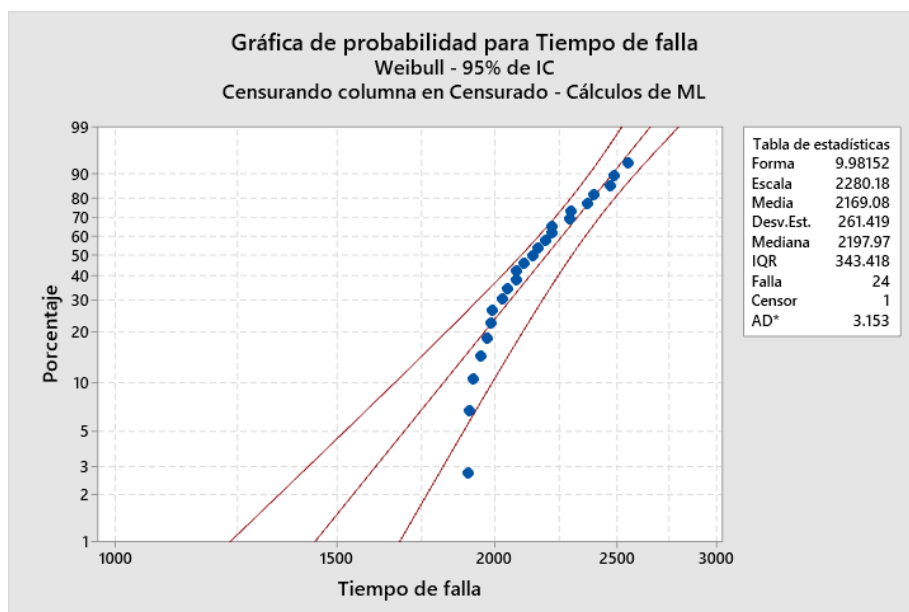
Probabilidad de falla para los entredientes cargador frontal CF-K003

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	1438.2	113.8	1231.6	1679.5
2	1542.4	106.3	1347.6	1765.4
3	1607.2	101.2	1420.6	1818.2
4	1655.0	97.2	1475.1	1856.9
5	1693.3	93.9	1518.8	1887.8
6	1725.4	91.2	1555.7	1913.7
7	1753.2	88.7	1587.7	1936.0
8	1777.8	86.5	1616.0	1955.7
9	1799.9	84.5	1641.6	1973.4
10	1819.9	82.7	1664.8	1989.5
20	1962.0	69.8	1829.8	2103.8
30	2056.4	61.7	1938.9	2181.1
40	2131.8	56.0	2024.8	2244.5
50	2198.0	51.9	2098.5	2302.2
60	2260.3	49.3	2165.7	2359.0
70	2323.0	48.2	2230.5	2419.3
80	2391.5	49.0	2297.5	2489.5
90	2478.9	53.2	2376.8	2585.3
91	2490.0	53.9	2386.5	2598.0
92	2502.0	54.8	2396.8	2611.8
93	2514.9	55.9	2407.8	2626.8
94	2529.2	57.1	2419.8	2643.5
95	2545.1	58.5	2433.0	2662.4
96	2563.5	60.3	2448.1	2684.4
97	2585.6	62.5	2465.9	2711.0
98	2614.1	65.6	2488.6	2745.9
99	2657.2	70.7	2522.1	2799.5

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 41

Probabilidad de falla entredientes del CF-K003

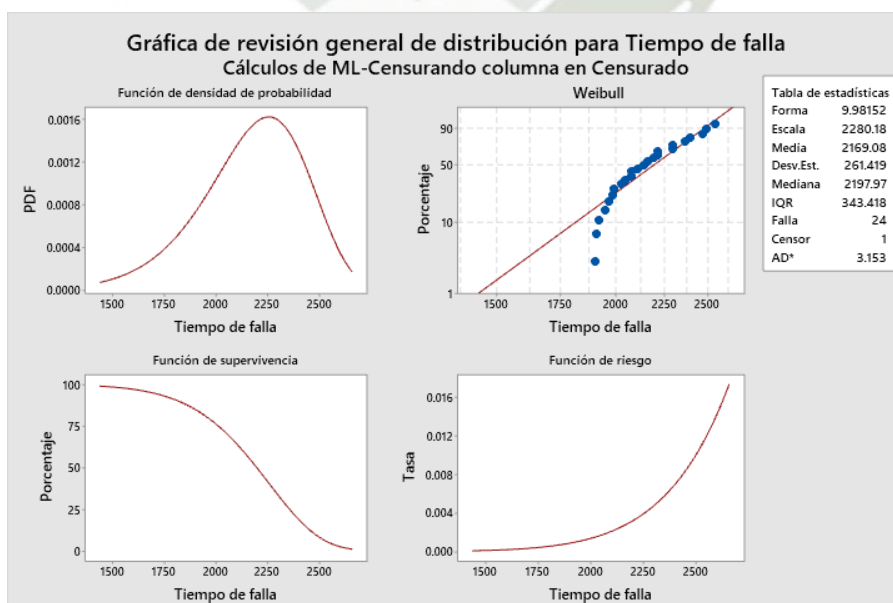


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 42 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 42

Revisión general de la distribución de falla entredientes del CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.6. Empaque tapa de balancines volquete Volvo FMX 440

De acuerdo a la Tabla 17, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 43

Parámetros distribución Weibull empaque tapa de balancines CV-V005

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	14.9029	2.35121	10.9390	20.3032
Escala	2451.43	34.7217	2384.31	2520.43

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 43 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para el empaque de tapa de balancines del volquete Volvo CV-V005.

Figura 44

Características distribución Weibull empaque tapa de balancines CV-V005

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	2366.77	38.9501	2291.65	2444.35
Desviación estándar	194.767	27.7416	147.325	257.488
Mediana	2391.87	37.8807	2318.77	2467.28
Primer cuartil(Q1)	2254.82	50.1189	2158.70	2355.22
Tercer cuartil(Q3)	2505.75	33.7346	2440.50	2572.75
Rango intercuartil(IQR)	250.931	37.4201	187.335	336.116

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 44 se muestran las características de la distribución de Weibull para el empaque de tapa de balancines del volquete Volvo CV-V005.

En la Tabla 27 y Figura 45 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 2009 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 1863 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 27

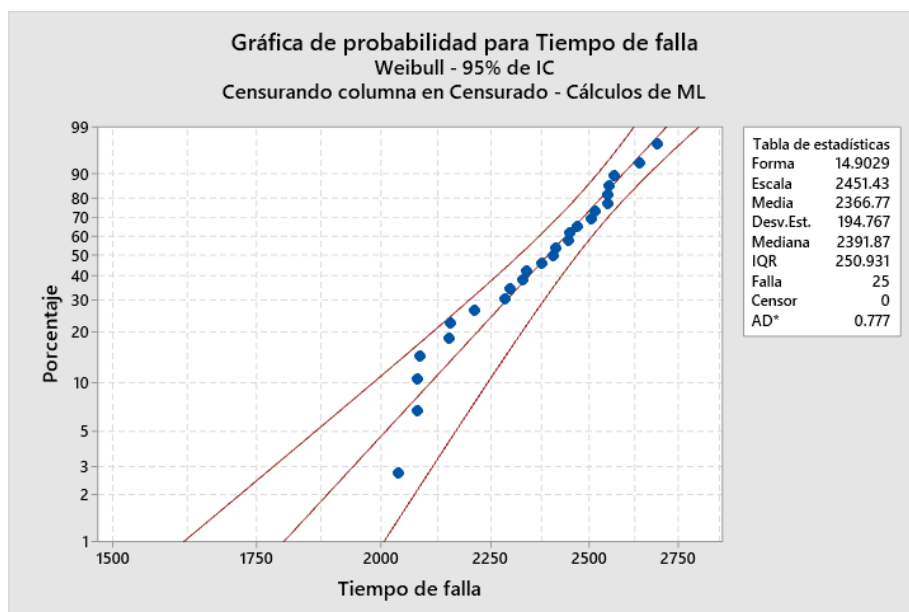
Probabilidad de falla empaque tapa de balancines volquete CV-V005

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	1800.4	98.8	1616.7	2004.9
2	1886.7	90.1	1718.1	2071.9
3	1939.4	84.6	1780.6	2112.5
4	1977.9	80.4	1826.4	2142.0
5	2008.5	77.1	1862.9	2165.4
6	2033.9	74.3	1893.3	2184.9
7	2055.8	71.9	1919.6	2201.6
8	2075.0	69.8	1942.7	2216.4
9	2092.2	67.9	1963.4	2229.6
10	2107.9	66.1	1982.2	2241.5
20	2216.7	54.1	2113.1	2325.4
30	2287.6	46.8	2197.7	2381.2
40	2343.4	41.6	2263.2	2426.4
50	2391.9	37.9	2318.8	2467.3
60	2437.1	35.3	2368.9	2507.3
70	2482.2	33.9	2416.6	2549.5
80	2531.0	34.0	2465.2	2598.5
90	2592.5	36.5	2521.9	2665.1
91	2600.3	37.0	2528.7	2673.9
92	2608.7	37.6	2536.0	2683.5
93	2617.7	38.3	2543.7	2693.9
94	2627.6	39.1	2552.1	2705.4
95	2638.7	40.0	2561.4	2718.4
96	2651.5	41.2	2571.9	2733.5
97	2666.7	42.7	2584.3	2751.8
98	2686.4	44.8	2600.0	2775.7
99	2716.0	48.2	2623.0	2812.2

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 45

Probabilidad de falla empaque tapa de balancines CV-V005

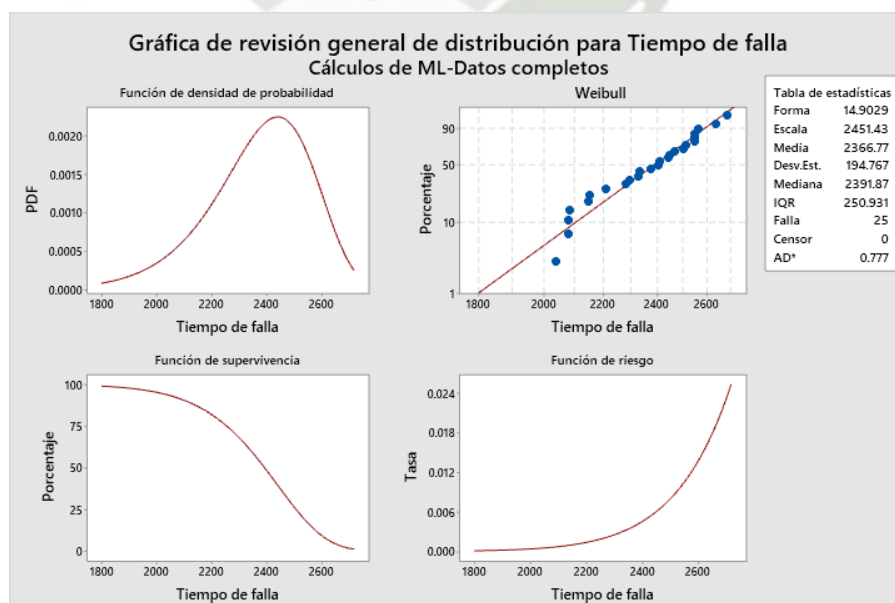


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 46 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 46

Revisión general distribución de falla empaque tapa de balancines CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.7. Tubo flexible de escape largo volquete Volvo FMX 440

De acuerdo a la Tabla 18, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 47

Parámetros distribución Weibull tubo flexible escape largo CV-V005

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	15.1062	2.23386	11.3053	20.1849
Escala	3013.64	42.4039	2931.66	3097.91

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 47 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para el tubo flexible escape largo del volquete Volvo CV-V005.

Figura 48

Características distribución Weibull tubo flexible escape largo CV-V005

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	2910.81	47.2588	2819.64	3004.92
Desviación estándar	236.445	31.4870	182.128	306.961
Mediana	2941.40	46.0442	2852.53	3033.04
Primer cuartil(Q1)	2775.06	59.7085	2660.47	2894.59
Tercer cuartil(Q3)	3079.51	41.0560	3000.08	3161.04
Rango intercuartil(IQR)	304.452	42.4338	231.676	400.090

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 48 se muestran las características de la distribución de Weibull para el tubo flexible escape largo del volquete Volvo CV-V005.

En la Tabla 28 y Figura 49 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 2475 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 2306 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 28

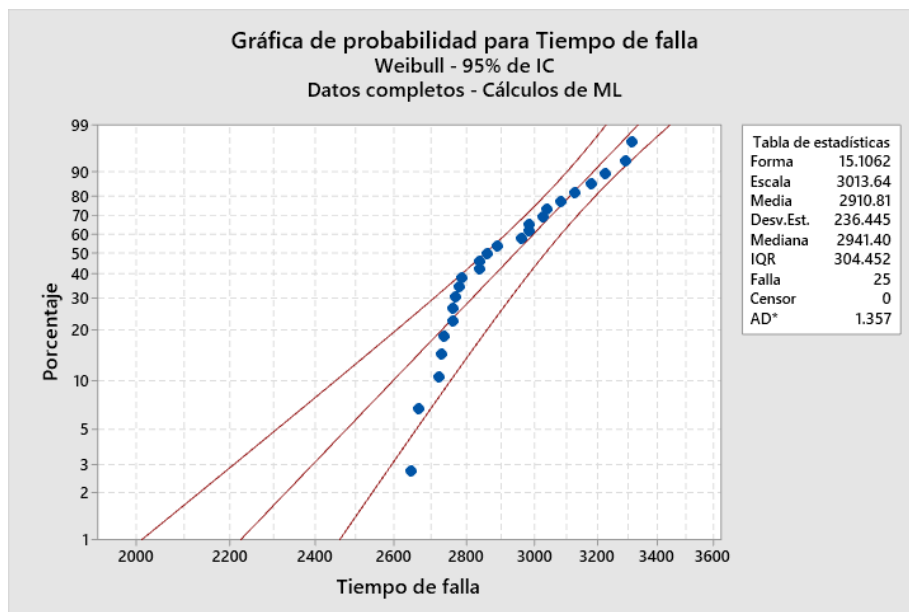
Probabilidad de falla tubo flexible escape largo volquete CV-V005

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	2222.5	114.5	2009.0	2458.7
2	2327.6	104.6	2131.3	2542.0
3	2391.8	98.4	2206.5	2592.6
4	2438.6	93.7	2261.7	2629.3
5	2475.7	90.0	2305.5	2658.5
6	2506.6	86.8	2342.1	2682.7
7	2533.2	84.1	2373.7	2703.5
8	2556.6	81.7	2401.4	2721.9
9	2577.6	79.5	2426.3	2738.3
10	2596.5	77.6	2448.8	2753.2
20	2728.8	64.2	2605.8	2857.6
30	2814.8	56.0	2707.2	2926.8
40	2882.6	50.2	2785.7	2982.8
50	2941.4	46.0	2852.5	3033.0
60	2996.3	43.1	2913.0	3081.9
70	3050.9	41.4	2970.9	3133.1
80	3110.1	41.2	3030.4	3191.9
90	3184.7	43.5	3100.5	3271.2
91	3194.2	44.0	3109.0	3281.6
92	3204.3	44.6	3118.0	3292.9
93	3215.2	45.3	3127.7	3305.2
94	3227.2	46.1	3138.1	3318.9
95	3240.7	47.1	3149.7	3334.3
96	3256.1	48.3	3162.8	3352.2
97	3274.6	49.9	3178.4	3373.8
98	3298.4	52.1	3198.0	3402.1
99	3334.2	55.7	3226.8	3445.2

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 49

Probabilidad de falla tubo flexible escape largo CV-V005

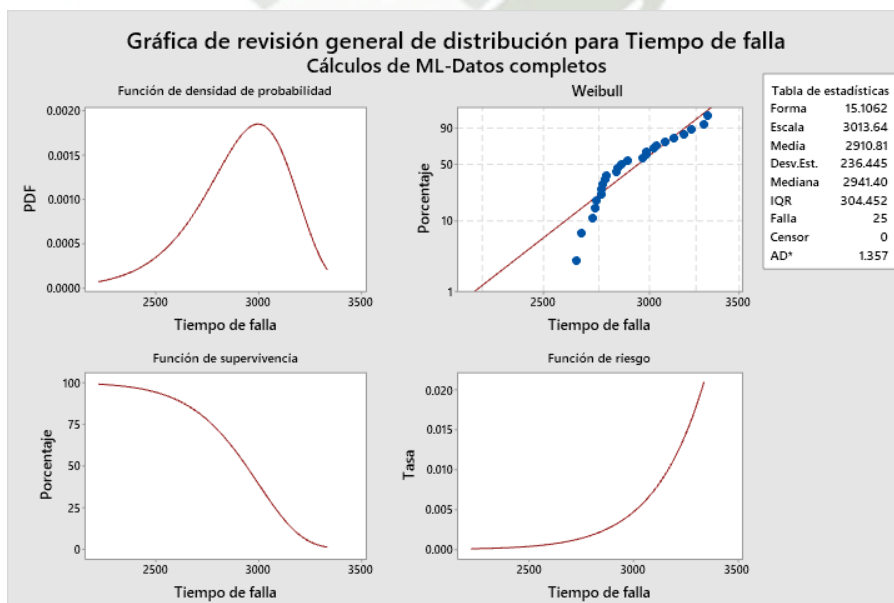


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 50 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 50

Revisión distribución de falla tubo flexible escape largo CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.8. Tubo flexible de escape corto volquete Volvo FMX 440

De acuerdo a la Tabla 19, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 51

Parámetros distribución Weibull tubo flexible escape corto CV-V005

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	12.0470	1.84429	8.92419	16.2626
Escala	3418.15	60.1599	3302.25	3538.12

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 51 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para el tubo flexible escape corto del volquete Volvo CV-V005.

Figura 52

Características distribución Weibull tubo flexible escape corto CV-V005

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	3276.04	66.2398	3148.75	3408.48
Desviación estándar	330.358	44.6501	253.477	430.557
Mediana	3315.73	65.1347	3190.49	3445.88
Primer cuartil(Q1)	3082.31	84.1580	2921.70	3251.75
Tercer cuartil(Q3)	3512.10	58.6089	3399.08	3628.87
Rango intercuartil(IQR)	429.784	61.2842	324.993	568.363

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 52 se muestran las características de la distribución de Weibull para el tubo flexible escape corto del volquete Volvo CV-V005.

En la Tabla 29 y Figura 53 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 2671 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 2438 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 29

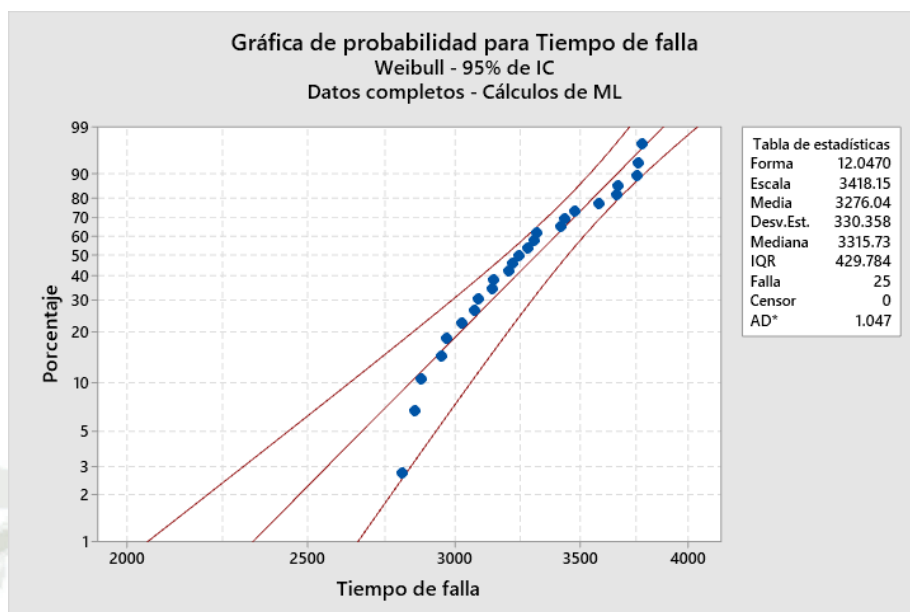
Probabilidad de falla tubo flexible escape corto volquete CV-V005

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	2333.2	154.9	2048.5	2657.6
2	2472.5	143.1	2207.4	2769.4
3	2558.2	135.3	2306.3	2837.6
4	2621.1	129.4	2379.4	2887.4
5	2671.3	124.6	2437.9	2927.0
6	2713.2	120.5	2486.9	2960.0
7	2749.3	117.0	2529.3	2988.4
8	2781.2	113.8	2566.8	3013.5
9	2809.8	111.0	2600.4	3036.0
10	2835.7	108.4	2631.0	3056.4
20	3018.0	90.3	2846.0	3200.3
30	3137.8	79.0	2986.7	3296.6
40	3232.8	71.0	3096.6	3375.0
50	3315.7	65.1	3190.5	3445.9
60	3393.4	61.1	3275.8	3515.3
70	3471.2	58.9	3357.7	3588.6
80	3555.9	59.0	3442.0	3673.5
90	3663.2	63.3	3541.3	3789.3
91	3676.8	64.1	3553.3	3804.6
92	3691.4	65.1	3566.1	3821.2
93	3707.2	66.2	3579.7	3839.3
94	3724.6	67.6	3594.5	3859.4
95	3744.1	69.2	3611.0	3882.1
96	3766.5	71.1	3629.6	3908.5
97	3793.3	73.7	3651.6	3940.6
98	3827.9	77.3	3679.4	3982.5
99	3880.1	83.2	3720.5	4046.6

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 53

Probabilidad de falla tubo flexible escape corto CV-V005

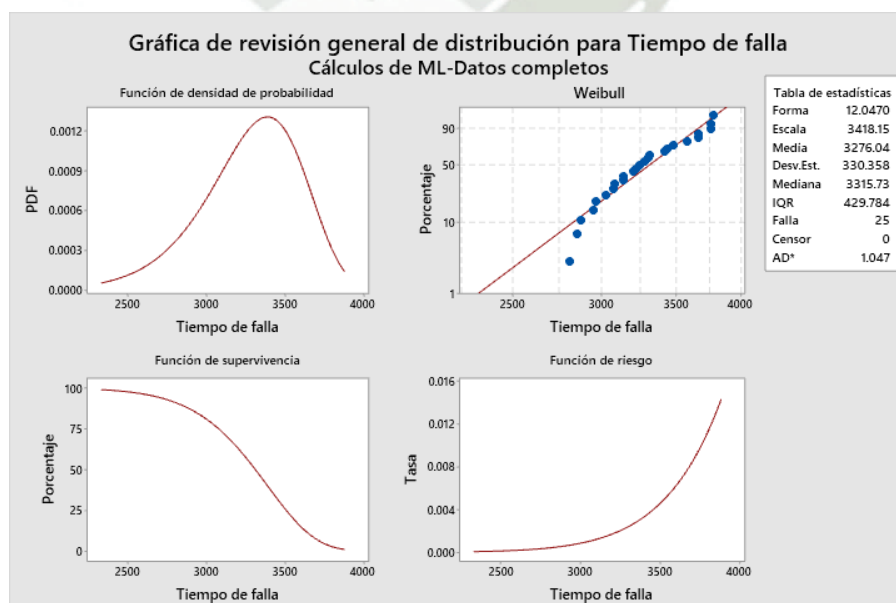


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 54 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 54

Revisión distribución de falla tubo flexible escape corto CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.9. Correa del ventilador volquete Volvo FMX 440

De acuerdo a la Tabla 20, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 55

Parámetros distribución Weibull correa del ventilador CV-V005

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Forma	21.3373	4.11806	14.6170	31.1473
Escala	6272.44	76.9503	6123.41	6425.08

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 55 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para la correa de ventilador del volquete Volvo CV-V005.

Figura 56

Características distribución Weibull correa del ventilador CV-V005

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación estándar	Inferior	Superior	
Media(MTTF)	6115.82	84.1964	5953.01	6283.09
Desviación estándar	355.993	64.4447	249.661	507.613
Mediana	6165.61	81.5347	6007.86	6327.51
Primer cuartil(Q1)	5916.67	106.335	5711.89	6128.80
Tercer cuartil(Q3)	6369.19	77.3027	6219.47	6522.52
Rango intercuartil(IQR)	452.522	84.7578	313.479	653.237

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 56 se muestran las características de la distribución de Weibull para la correa de ventilador del volquete Volvo CV-V005.

En la Tabla 30 y Figura 57 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 5457 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 5132horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 30

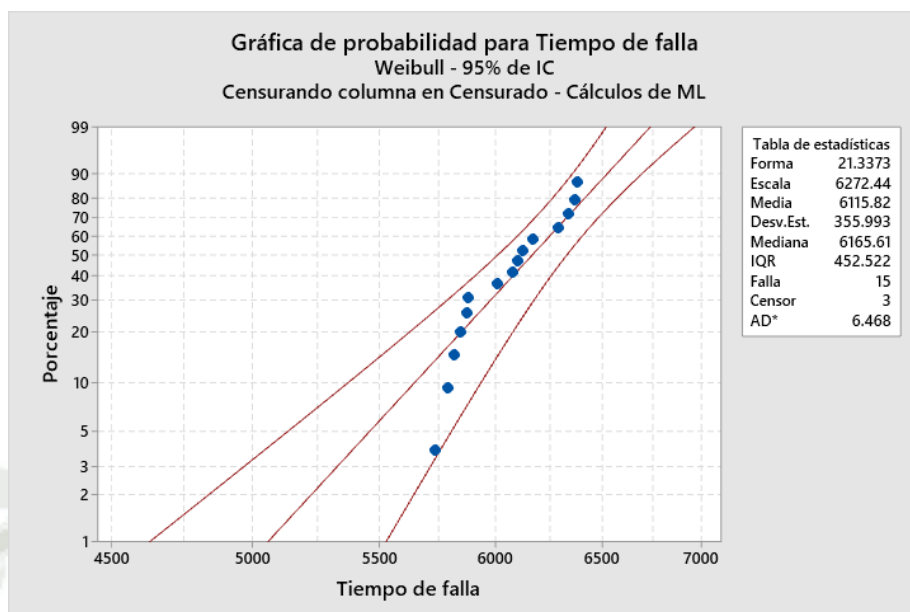
Probabilidad de falla correa del ventilador volquete CV-V005

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	5056.0	228.9	4626.7	5525.1
2	5224.2	204.9	4837.6	5641.6
3	5325.7	190.2	4965.7	5711.8
4	5399.3	179.4	5058.8	5762.6
5	5457.4	170.9	5132.5	5802.8
6	5505.5	163.8	5193.6	5836.2
7	5546.8	157.8	5246.0	5864.9
8	5583.0	152.5	5292.0	5890.1
9	5615.4	147.8	5333.0	5912.7
10	5644.6	143.6	5370.1	5933.1
20	5846.7	115.4	5624.9	6077.2
30	5976.6	99.1	5785.4	6174.1
40	6078.1	88.5	5907.1	6254.0
50	6165.6	81.5	6007.9	6327.5
60	6246.8	77.6	6096.5	6400.8
70	6327.2	76.6	6178.9	6479.2
80	6413.9	79.0	6260.9	6570.6
90	6522.5	86.8	6354.6	6694.8
91	6536.2	88.1	6365.8	6711.1
92	6550.8	89.6	6377.6	6728.7
93	6566.6	91.2	6390.2	6747.9
94	6584.0	93.2	6403.9	6769.2
95	6603.4	95.4	6419.0	6793.2
96	6625.7	98.2	6436.0	6821.0
97	6652.3	101.6	6456.0	6854.6
98	6686.5	106.3	6481.3	6898.2
99	6737.8	113.9	6518.3	6964.7

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 57

Probabilidad de falla correa del ventilador CV-V005

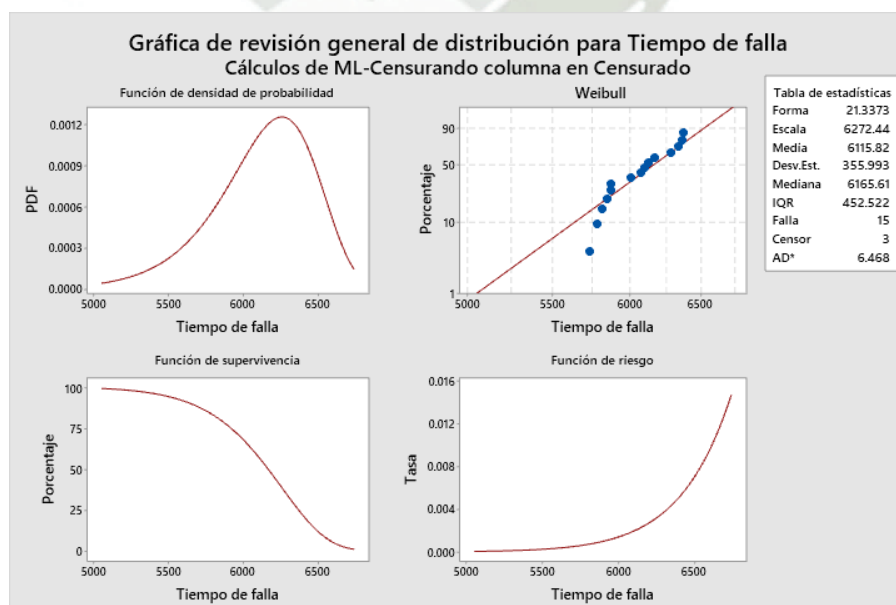


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 58 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 58

Revisión distribución de falla correa del ventilador CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

4.5.10. Válvula de freno de motor volquete Volvo FMX 440

De acuerdo a la Tabla 21, procedemos a evaluar el modelo estadístico de Weibull a nuestra distribución de fallas, usaremos Minitab 2019.

Figura 59

Parámetros distribución Weibull válvula freno de motor CV-V005

Cálculos del parámetro				
Error IC normal de 95.0%				
Parámetro	Estimación	estándar	Inferior	Superior
Forma	21.3779	3.42349	15.6190	29.2603
Escala	5536.88	54.7243	5430.66	5645.19

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 59 se muestran los parámetros de la distribución de Weibull para la válvula freno de motor del volquete Volvo CV-V005.

Figura 60

Características distribución Weibull válvula freno de motor CV-V005

Características de distribución				
Error IC normal de 95.0%				
	Estimación	estándar	Inferior	Superior
Media(MTTF)	5398.88	62.9342	5276.93	5523.65
Desviación estándar	313.682	46.6347	234.391	419.794
Mediana	5442.77	60.2962	5325.86	5562.24
Primer cuartil(Q1)	5223.42	81.6410	5065.83	5385.91
Tercer cuartil(Q3)	5622.13	52.7622	5519.66	5726.50
Rango intercuartil(IQR)	398.713	61.3489	294.909	539.054

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 60 se muestran las características de la distribución de Weibull para la válvula freno de motor del volquete Volvo CV-V005.

En la Tabla 31 y Figura 61 se muestran la probabilidad de falla (Inversa de la confiabilidad) en porcentajes junto a los límites de confianza. El componente tiene una confiabilidad del 95% a 4819 horas de operación, tomando en cuenta el IC inferior el valor es 4569 horas para una confiabilidad del 95%.

Tabla 31

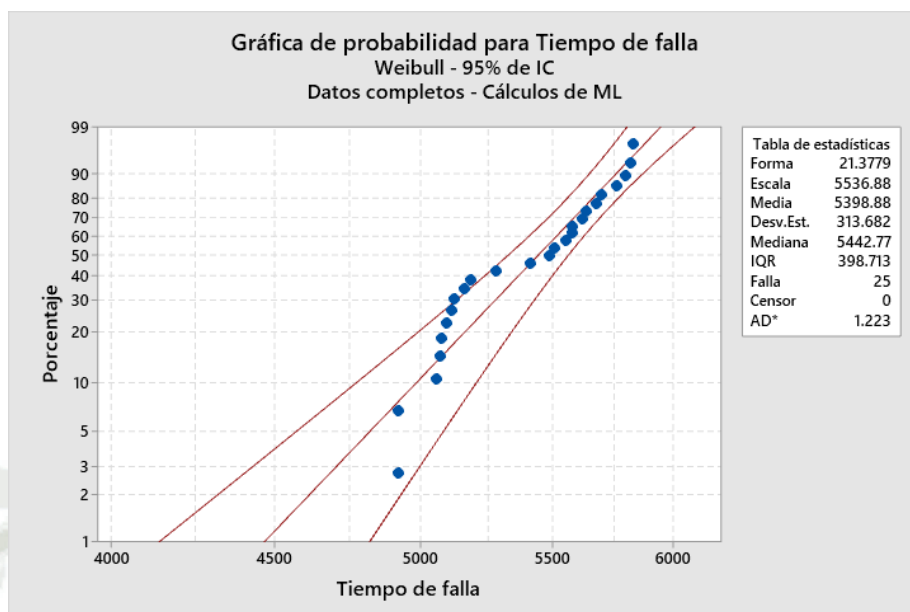
Probabilidad de falla válvula freno de motor volquete CV-V005

Porcentaje	Horas	Error estándar	IC normal de 95.0%	
			Inferior	Superior
1	4464.9	173.2	4138.0	4817.6
2	4613.2	155.6	4318.0	4928.5
3	4702.6	144.8	4427.1	4995.2
4	4767.5	136.9	4506.6	5043.5
5	4818.7	130.6	4569.4	5081.6
6	4861.1	125.4	4621.5	5113.1
7	4897.5	120.9	4666.2	5140.2
8	4929.4	116.9	4705.5	5164.0
9	4957.9	113.4	4740.5	5185.3
10	4983.7	110.2	4772.2	5204.5
20	5161.7	88.7	4990.7	5338.6
30	5276.2	75.8	5129.7	5427.0
40	5365.6	66.8	5236.2	5498.2
50	5442.8	60.3	5325.9	5562.2
60	5514.3	55.8	5406.1	5624.7
70	5585.2	53.2	5481.9	5690.4
80	5661.5	53.0	5558.6	5766.4
90	5757.2	56.7	5647.2	5869.3
91	5769.2	57.4	5657.8	5882.9
92	5782.1	58.3	5669.0	5897.5
93	5796.1	59.3	5681.0	5913.5
94	5811.4	60.5	5694.0	5931.2
95	5828.5	61.9	5708.4	5951.1
96	5848.1	63.7	5724.6	5974.2
97	5871.6	65.9	5743.7	6002.2
98	5901.7	69.1	5767.9	6038.6
99	5946.9	74.2	5803.3	6094.1

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 61

Probabilidad de falla válvula freno de motor CV-V005

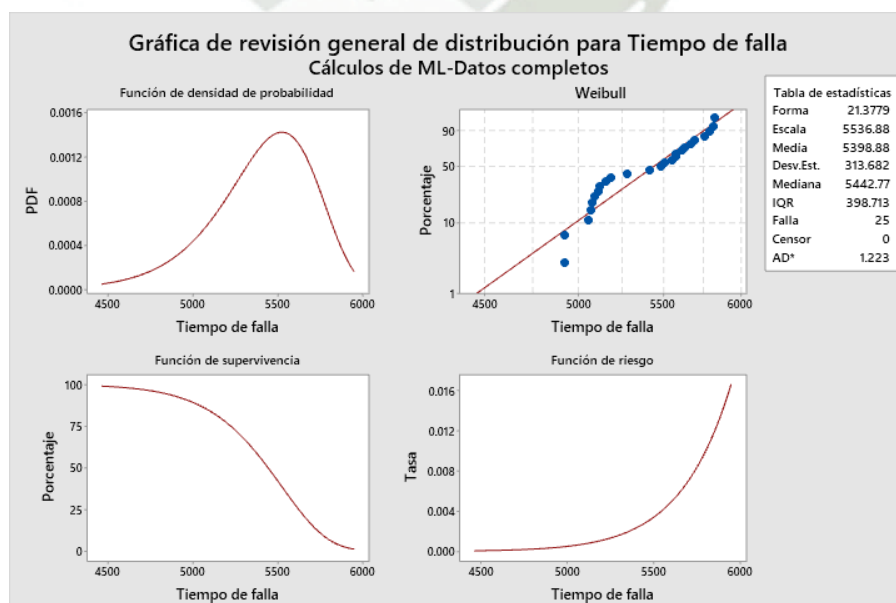


Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 62 se muestra la revisión gráfica general de la distribución de falla y los parámetros.

Figura 62

Revisión distribución de falla válvula freno de motor CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

4.6. Análisis de costos por cambio preventivo y por falla

4.6.1. Uñas cargador frontal Komatsu WA470-6

En las Tablas 32 y 33 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para las uñas del cargador Frontal Komatsu WA470-6 CF-K003.

Tabla 32

Costo por cambio preventivo de uñas del cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Uñas k25	9	\$121.21	\$1,090.89
Seguros k25	9	\$33.04	\$297.36
Costo Mano de Obra	4	\$25.00	\$100.00
Total			\$1,488.25

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 33

Costo por cambio correctivo de las uñas del cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Uñas k25	9	\$121.21	\$1,090.89
Seguros k25	9	\$33.04	\$297.36
Costo de mano de obra	6	\$25.00	\$150.00
viáticos	2	\$20.00	\$40.00
Alquiler de camioneta	1	\$60.00	\$60.00
Combustible	1	\$60.00	\$60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$47.00	\$188.00
Total			\$1,886.25

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.2. Taloneras cargador frontal Komatsu WA470-6

En las Tablas 34 y 35 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para las taloneras del cargador Frontal Komatsu WA470-6 CF-K003.

Tabla 34

Costo por cambio preventivo de taloneras del cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Taloneras en U	2	\$88.89	\$177.78
Perno	4	\$16.28	\$65.10
Tuerca	4	\$10.35	\$41.40
Arandela	4	\$0.80	\$3.20
Costo Mano de Obra	4	\$25.00	\$100.00
Total			\$387.48

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 35

Costo por cambio correctivo de taloneras cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Taloneras en U	2	\$88.89	\$177.78
Perno	4	\$16.28	\$65.10
Tuerca	4	\$10.35	\$41.40
Arandela	4	\$0.80	\$3.20
Costo de mano de obra	5	\$25.00	\$125.00
Viáticos	2	\$20.00	\$40.00
Alquiler de camioneta	1	\$60.00	\$60.00
Combustible	1	\$60.00	\$60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$47.00	\$188.00
Total			\$760.48

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.3. Pernería adapters cargador frontal Komatsu WA470-6

En las Tablas 36 y 37 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para la pernería de los adapters del cargador Frontal Komatsu WA470-6 CF-K003.

Tabla 36

Costo cambio preventivo pernería adapters cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Pernos/tuercas adapter lateral	4	\$8.43	\$33.70
Pernos/tuercas adapter central	21	\$8.43	\$176.93
Arandela	25	\$0.80	\$20.00
Costo Mano de Obra	4	\$25.00	\$100.00
Total			\$330.63

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 37

Costo cambio correctivo pernería adapters cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Pernos/tuercas adapter lateral	4	\$8.43	\$33.70
Pernos/tuercas adapter central	21	\$8.43	\$176.93
Arandela	25	\$0.80	\$20.00
Costo de mano de obra viáticos	6	\$25.00	\$150.00
	2	\$20.00	\$40.00
Alquiler de camioneta	1	\$60.00	\$60.00
Combustible	1	\$60.00	\$60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$47.00	\$188.00
Total			\$728.63

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.4. Pernería entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6

En las Tablas 38 y 39 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para la pernería de los entredientes del cargador Frontal Komatsu WA470-6 CF-K003.

Tabla 38

Costo cambio preventivo pernería entredientes cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Pernos/tuercas	16	\$8.43	\$134.80
Arandela	16	\$0.80	\$12.80
Costo Mano de Obra	4	\$25.00	\$100.00
Total			\$247.60

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 39

Costo cambio correctivo pernería entredientes cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Pernos/tuercas	16	\$8.43	\$134.80
Arandela	16	\$0.80	\$12.80
Costo de mano de obra	6	\$25.00	\$150.00
Viáticos	2	\$20.00	\$40.00
Alquiler de camioneta	1	\$60.00	\$60.00
Combustible	1	\$60.00	\$60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$47.00	\$188.00
Total			\$645.60

Fuente: Elaboración

4.6.5. Entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6

En las Tablas 40 y 41 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos los entredientes del cargador Frontal Komatsu WA470-6 CF-K003.

Tabla 40

Costo cambio preventivo entredientes cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Entrediente lateral	2	\$42.39	\$84.78
Entrediente central	6	\$51.70	\$310.20
Pernos/tuercas	16	\$8.43	\$134.80
Arandela	16	\$0.80	\$12.80
Costo Mano de Obra	4	\$25.00	\$100.00
Total			\$642.58

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 41

Costo cambio correctivo entredientes cargador frontal CF-K003

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Entrediente lateral	2	\$42.39	\$84.78
Entrediente central	6	\$51.70	\$310.20
Pernos/tuercas	16	\$8.43	\$134.80
Arandela	16	\$0.80	\$12.80
Costo de mano de obra	6	\$25.00	\$150.00
Viáticos	2	\$20.00	\$40.00
Alquiler de camioneta	1	\$60.00	\$60.00
Combustible	1	\$60.00	\$60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$47.00	\$188.00
Total			\$1,040.58

Fuente: Elaboración

4.6.6. Empaque de tapa de balancines volquete Volvo FMX 440

En las Tablas 42 y 43 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para el empaque de tapa de balancines del volquete Volvo FMX 440 CV-V005.

Tabla 42

Costo cambio preventivo empaque tapa de balancines volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Empaque tapa de balancines	1	\$133.81	\$133.81
Costo Mano de Obra	3	\$25.00	\$75.00
Total			\$208.81

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 43

Costo cambio correctivo empaque tapa de balancines volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Empaque tapa de balancines	1	\$ 133.81	\$ 133.81
Costo de mano de obra	3	\$ 25.00	\$ 75.00
Viáticos	2	\$ 20.00	\$ 40.00
Alquiler de camioneta	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Combustible	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$ 47.00	\$ 188.00
Total			\$ 556.81

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.7. Tubo flexible de escape largo volquete Volvo FMX 440

En las Tablas 44 y 45 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para el tubo flexible de escape largo del volquete Volvo FMX 440 CV-V005.

Tabla 44

Costo cambio preventivo tubo flexible de escape largo volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Tubo flexible escape largo	1	\$ 168.59	\$ 168.59
Abrazadera	2	\$ 35.15	\$ 70.30
Costo Mano de Obra	3	\$ 25.00	\$ 75.00
Total			\$ 313.89

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 45

Costo correctivo tubo flexible de escape largo volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Tubo flexible escape largo	1	\$ 168.59	\$ 168.59
Abrazadera	4	\$ 35.15	\$ 140.60
Costo de mano de obra	5	\$ 25.00	\$ 125.00
Viáticos	2	\$ 20.00	\$ 40.00
Alquiler de camioneta	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Combustible	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$ 47.00	\$ 188.00
Total			\$ 782.19

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.8. Tubo flexible de escape corto volquete Volvo FMX 440

En las Tablas 46 y 47 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para el tubo flexible de escape corto del volquete Volvo FMX 440 CV-V005.

Tabla 46

Costo cambio preventivo tubo flexible de escape corto volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Tubo flexible escape corto	1	\$124.58	\$124.58
Abrazadera	2	\$35.15	\$70.30
Costo Mano de Obra	3	\$25.00	\$75.00
Total			\$269.88

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 47

Costo correctivo tubo flexible de escape corto volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Tubo flexible escape corto	1	\$ 124.58	\$ 124.58
Abrazadera	2	\$ 35.15	\$ 70.30
Costo de mano de obra	5	\$ 25.00	\$ 125.00
Viáticos	2	\$ 20.00	\$ 40.00
Alquiler de camioneta	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Combustible	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$ 47.00	\$ 188.00
Total			\$ 667.88

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.9. Correa del ventilador volquete Volvo FMX 440

En las Tablas 48 y 49 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para la correa del ventilador del volquete Volvo FMX 440 CV-V005.

Tabla 48

Costo cambio preventivo correa del ventilador volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Correa del ventilador	1	\$97.62	\$97.62
Costo Mano de Obra	3	\$25.00	\$75.00
Total			\$172.62

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 49

Costo cambio correctivo correa del ventilador volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Correa del ventilador	1	\$ 97.62	\$ 97.62
Costo de mano de obra	5	\$ 25.00	\$ 125.00
Viáticos	2	\$ 20.00	\$ 40.00
Alquiler de camioneta	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Combustible	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$ 47.00	\$ 188.00
Total			\$ 570.62

Fuente: Elaboración Propia.

4.6.10. Válvula de freno de motor volquete Volvo FMX 440

En las Tablas 50 y 51 se muestra los costos asociados a cambios por falla y cambios preventivos para válvula de freno de motor del volquete Volvo FMX 440 CV-V005.

Tabla 50

Costo cambio preventivo válvula freno de motor volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Válvula de freno de motor	1	\$635.64	\$635.64
Costo Mano de Obra	3	\$25.00	\$75.00
Total			\$710.64

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 51

Costo correctivo válvula freno de motor volquete CV-V005

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Válvula de freno de motor	1	\$ 635.64	\$ 635.64
Costo de mano de obra	5	\$ 25.00	\$ 125.00
viáticos	2	\$ 20.00	\$ 40.00
Alquiler de camioneta	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Combustible	1	\$ 60.00	\$ 60.00
Costo de pérdida de producción	4	\$ 47.00	\$ 188.00
Total			\$ 1,108.64

Fuente: Elaboración Propia.

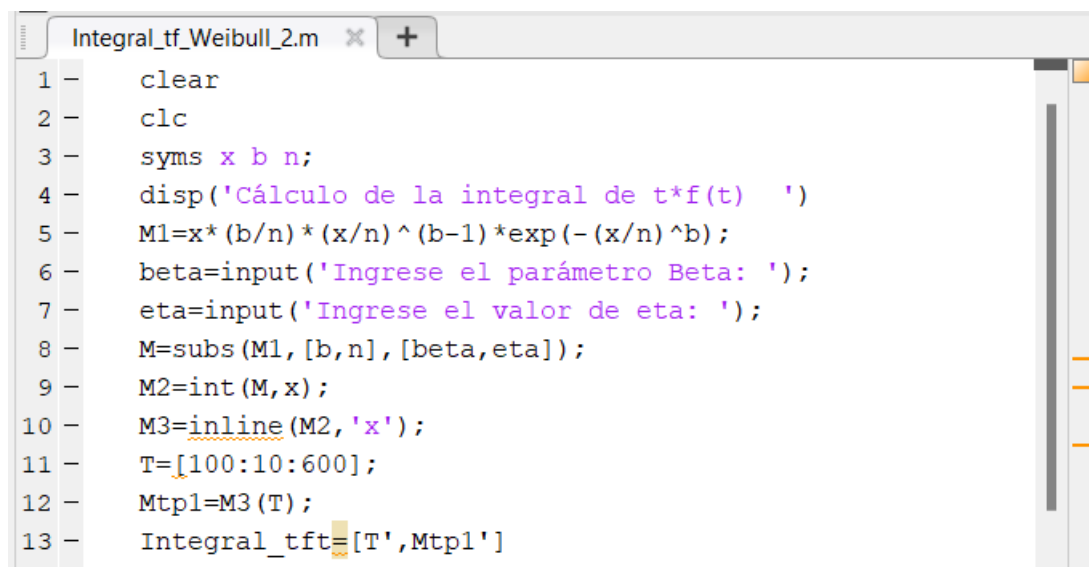
4.7. Desarrollo del modelo matemático

Para el desarrollo de modelo matemático de acuerdo a nuestro proceso de implementación, de la ecuación 33 necesitamos conocer el valor mínimo de Ctp para los diferentes valores de tiempo (Tp).

El desafío es hallar $\int_{-\infty}^{t_p} t f(t) dt$ para la iteración de los diferentes tiempos de nuestra evaluación. Por la necesidad se ha generado el siguiente código en Matlab para hallar la matriz de datos, ver Figura 63.

Figura 63

Código Matlab para hallar el tiempo medio hasta la falle en t.



```
1 - clear
2 - clc
3 - syms x b n;
4 - disp('Cálculo de la integral de t*f(t) ')
5 - M1=x*(b/n)*(x/n)^(b-1)*exp(-(x/n)^b);
6 - beta=input('Ingrese el parámetro Beta: ');
7 - eta=input('Ingrese el valor de eta: ');
8 - M=subs(M1,[b,n],[beta,eta]);
9 - M2=int(M,x);
10 - M3=inline(M2,'x');
11 - T=[100:10:600];
12 - Mtp1=M3(T);
13 - Integral_tft=[T',Mtp1']
```

Fuente: Elaboración Propia.

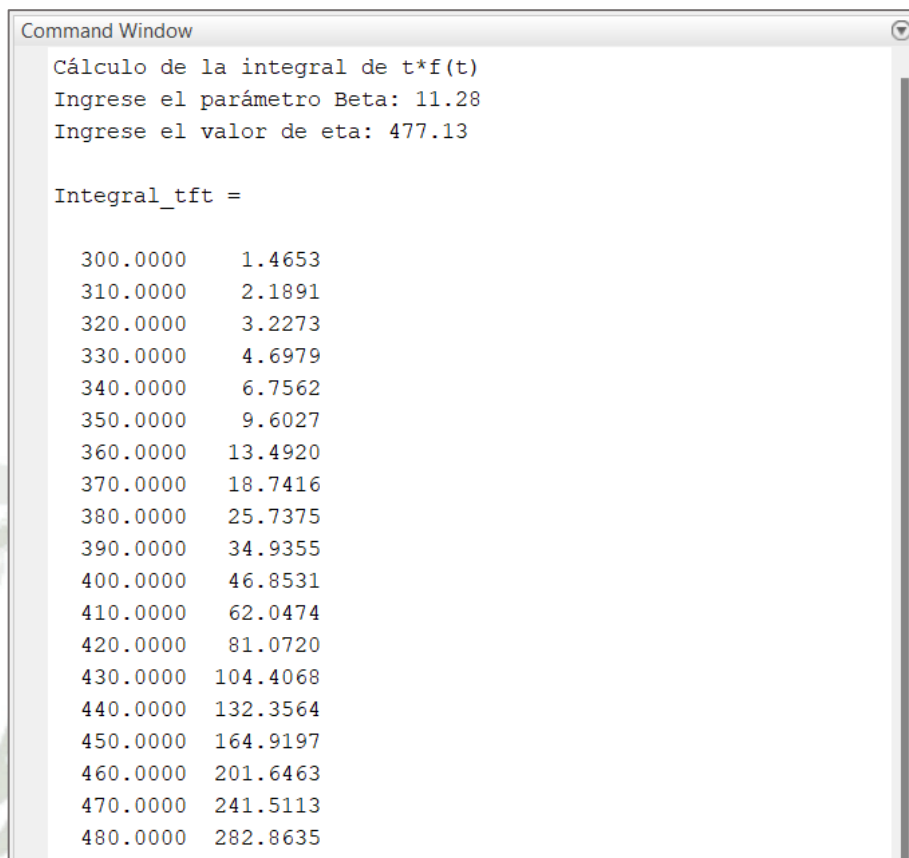
El programa pide como input los parámetros de la distribución de Weibull, el ingreso de beta y eta.

Tener en cuenta en el código, que la matriz de salida está definida por el intervalo de tiempos en la variable “T”, que quiere decir que la iteración en el código ejemplo va desde las 100 horas hasta las 600 horas de 10 en 10 horas, este dato es variable de acuerdo a nuestra muestra de datos de fallas y la necesidad de mostrar las gráficas para hallar el intervalo óptimo de cambio preventivo.

En la Figura 64 se muestra el ejemplo de la salida de la matriz de datos para $\int_{-\infty}^{t_p} t f(t) dt$ de acuerdo al intervalo de tiempo desde las 300 horas hasta las 480 horas de 10 en 10 horas (beta 11.28 y eta 477.13).

Figura 64

*Valores de la integral de $t*f(t)$ para tiempos de 300 a 480 horas*



Fuente Propia

Con esto ya tenemos toda la información para poder iterar los datos para los diferentes tiempos y poder hallar el tiempo óptimo de cambio preventivo, lo que concluye en un valor mínimo de $C(t_p)$.

El resumen se muestra en la hoja de cálculo del anexo 1.

La plantilla del anexo 1, solicita el ingreso de los datos de la Figura 65.

Donde **C(tp) \$/Hrs** es el valor mínimo de la iteración para cada valor de T(Hr). Se muestra en la Figura 66.

Figura 65
Datos para el cálculo de la frecuencia optima de cambio preventivo

Parámetro	Datos
Media	456.2
Beta	11.28
eta	477.13
Cp	\$ 1,488.25
Cf	\$ 1,886.25
Costo Falla/hrs	\$ 4.135
C(tp) \$/Hrs	\$ 3.793
Ahorro	8.3%

Fuente Propia

El costo Falla/hrs representa la relación del Cf y la media (TPO), el porcentaje de ahorro bajo una política si solo se analizara el TPO representa la relación del costo del cambio optimo (Ctp) y el costo falla/hrs. Lo que se traduce en el ahorro.

Figura 66
Datos de confiabilidad, probabilidad de falla, TPO y C(tp) para T(hrs)

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{t_0}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
300	99.5%	0.53%	1.4653	275.5	4.9700	0.03	4.94
310	99.2%	0.77%	2.1891	284.7	4.8137	0.05	4.77
320	98.9%	1.10%	3.2273	293.9	4.6686	0.06	4.60
330	98.4%	1.55%	4.6979	303.0	4.5343	0.09	4.45
340	97.8%	2.16%	6.7562	312.2	4.4104	0.12	4.29
350	97.0%	2.99%	9.6027	321.3	4.2967	0.16	4.14
360	95.9%	4.08%	13.4920	330.4	4.1933	0.21	3.98
370	94.5%	5.52%	18.7416	339.5	4.1004	0.28	3.82
380	92.6%	7.39%	25.7375	348.5	4.0184	0.37	3.65
390	90.2%	9.77%	34.9355	357.5	3.9480	0.48	3.47
400	87.2%	12.79%	46.8531	366.4	3.8897	0.61	3.28
410	83.5%	16.54%	62.0474	375.2	3.8445	0.77	3.07
420	78.9%	21.12%	81.0720	383.8	3.8130	0.97	2.85
430	73.4%	26.61%	104.4068	392.4	3.7958	1.20	2.60
440	67.0%	33.03%	132.3564	400.7	3.7932	1.46	2.33
450	59.7%	40.35%	164.9197	408.7	3.8049	1.76	2.05
460	51.6%	48.42%	201.6463	416.4	3.8298	2.08	1.75
470	43.0%	56.99%	241.5113	423.8	3.8659	2.42	1.44
480	34.3%	65.70%	282.8635	430.5	3.9099	2.77	1.14

Fuente Propia

4.7.1. Uñas cargador frontal Komatsu WA470-6

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 52

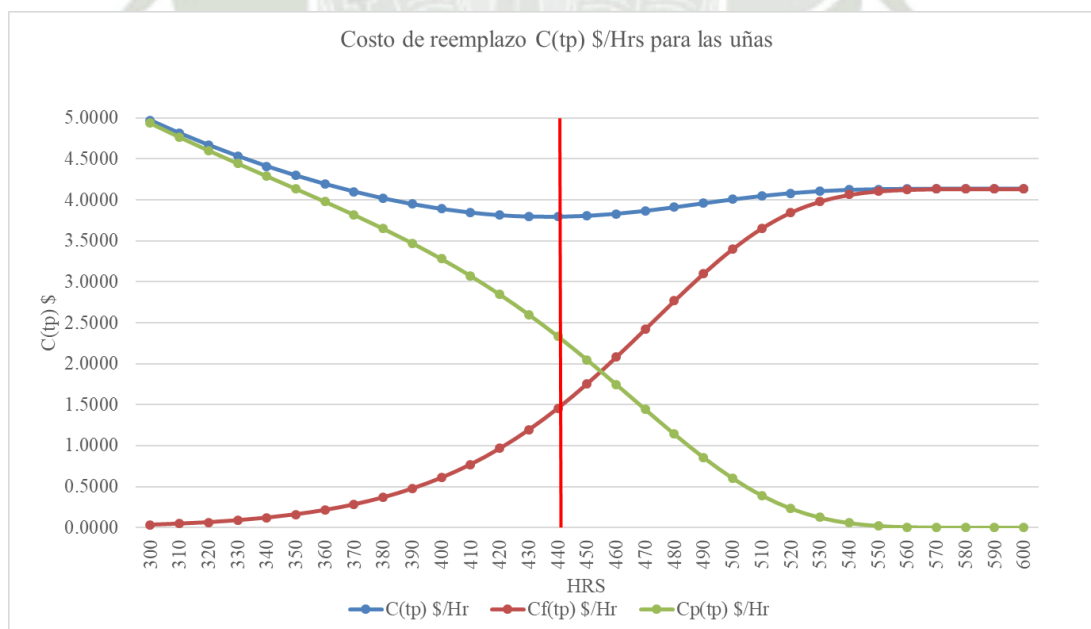
Resumen resultados cambio de uñas cargador frontal CF-K003

Parámetro	Datos
Media (TPO)	456.15 Hrs
Beta	11.28
eta	477.13
Cp	\$ 1,488.25
Cf	\$ 1,886.25
Costo Falla/hrs	\$ 4.13
C(tp) \$/Hr	\$3.793
Ahorro	8.3%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 67

Costo reemplazo C(pt) \$/hr uñas cargador frontal CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 53
R(t), F(t) y C(tp) cambio uñas cargador frontal CF-K003

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
300	99.5%	0.5%	1.4653	275.5	4.9700	0.03	4.94
310	99.2%	0.8%	2.1891	284.7	4.8137	0.05	4.77
320	98.9%	1.1%	3.2273	293.9	4.6686	0.06	4.60
330	98.4%	1.6%	4.6979	303.0	4.5343	0.09	4.45
340	97.8%	2.2%	6.7562	312.2	4.4104	0.12	4.29
350	97.0%	3.0%	9.6027	321.3	4.2967	0.16	4.14
360	95.9%	4.1%	13.4920	330.4	4.1933	0.21	3.98
370	94.5%	5.5%	18.7416	339.5	4.1004	0.28	3.82
380	92.6%	7.4%	25.7375	348.5	4.0184	0.37	3.65
390	90.2%	9.8%	34.9355	357.5	3.9480	0.48	3.47
400	87.2%	12.8%	46.8531	366.4	3.8897	0.61	3.28
410	83.5%	16.5%	62.0474	375.2	3.8445	0.77	3.07
420	78.9%	21.1%	81.0720	383.8	3.8130	0.97	2.85
430	73.4%	26.6%	104.4068	392.4	3.7958	1.20	2.60
440	67.0%	33.0%	132.3564	400.7	3.7932	1.46	2.33
450	59.7%	40.4%	164.9197	408.7	3.8049	1.76	2.05
460	51.6%	48.4%	201.6463	416.4	3.8298	2.08	1.75
470	43.0%	57.0%	241.5113	423.8	3.8659	2.42	1.44
480	34.3%	65.7%	282.8635	430.5	3.9099	2.77	1.14
490	25.9%	74.1%	323.5102	436.7	3.9579	3.10	0.86
500	18.3%	81.7%	360.9889	442.1	4.0052	3.40	0.60
510	12.0%	88.0%	393.0201	446.6	4.0475	3.65	0.39
520	7.1%	92.9%	418.0382	450.2	4.0816	3.85	0.23
530	3.8%	96.2%	435.6014	452.8	4.1061	3.98	0.12
540	1.8%	98.2%	446.4703	454.5	4.1214	4.06	0.06
550	0.7%	99.3%	452.2668	455.4	4.1296	4.11	0.02
560	0.2%	99.8%	454.8619	455.9	4.1333	4.13	0.01
570	0.1%	99.9%	455.8080	456.1	4.1347	4.13	0.00
580	0.0%	100.0%	456.08	456.1	4.1351	4.13	0.00
590	0.0%	100.0%	456.1380	456.1	4.1352	4.14	0.00
600	0.0%	100.0%	456.1472	456.1	4.1352	4.14	0.00

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 53, el tiempo óptimo de cambio de las uñas es de 440 horas, para una confiabilidad de 67%, se puede optar por 90.2% (390 hrs).

4.7.2. Taloneras cargador frontal Komatsu WA470-6

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 54

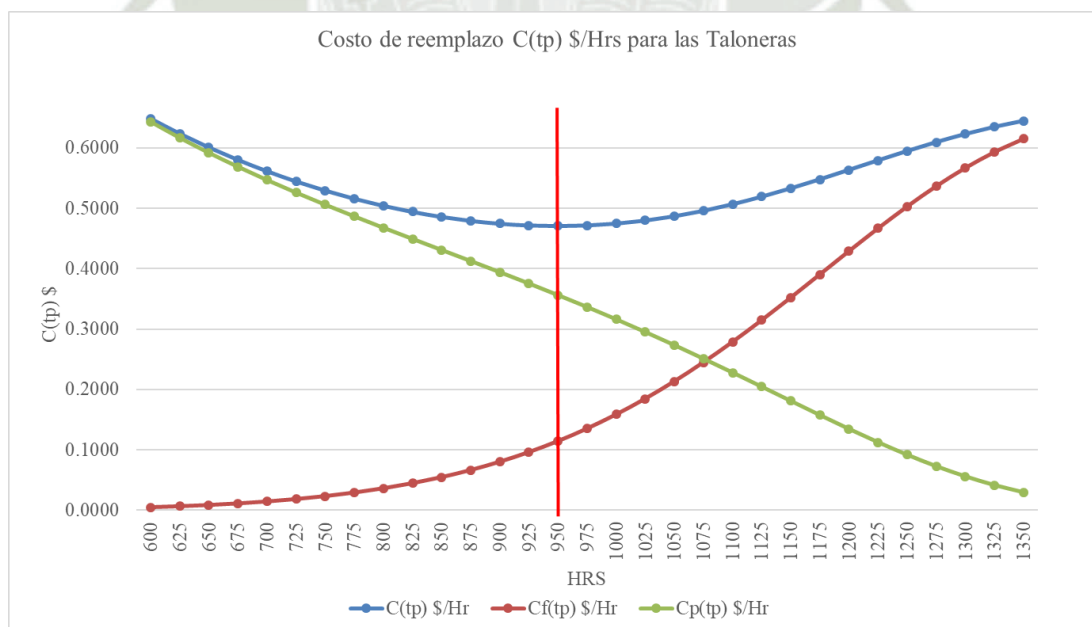
Resumen resultados cambio taloneras cargador frontal CF-K003

Parámetro	Datos
Media	1134.7 hrs
Beta	7.92
eta	1205.46
Cp	\$ 387.48
Cf	\$ 760.48
Costo Falla/hrs	\$ 0.670
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.471
Ahorro	29.8%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 68

Costo reemplazo C(pt) \$/hr taloneras cargador frontal CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 55
R(t), F(t) y C(tp) cambio taloneras cargador frontal CF-K003

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
600	99.6%	0.4%	2.1	528.3	0.6486	0.01	0.64
625	99.5%	0.6%	3.0	546.6	0.6237	0.01	0.62
650	99.3%	0.8%	4.3	574.8	0.6009	0.01	0.59
675	99.0%	1.0%	6.0	595.7	0.5803	0.01	0.57
700	98.7%	1.3%	8.3	618.8	0.5616	0.01	0.55
725	98.2%	1.8%	11.4	645.1	0.5446	0.02	0.53
750	97.7%	2.3%	15.3	663.7	0.5295	0.02	0.51
775	97.0%	3.0%	20.5	688.3	0.5160	0.03	0.49
800	96.2%	3.8%	27.1	710.6	0.5043	0.04	0.47
825	95.2%	4.8%	35.4	731.4	0.4943	0.04	0.45
850	93.9%	6.1%	45.9	753.6	0.4859	0.05	0.43
875	92.4%	7.6%	58.9	774.8	0.4794	0.07	0.41
900	90.6%	9.4%	75.0	797.0	0.4746	0.08	0.39
925	88.4%	11.6%	94.5	817.9	0.4718	0.10	0.38
950	85.9%	14.1%	118.2	840.0	0.4708	0.11	0.36
975	83.0%	17.0%	146.3	860.8	0.4718	0.14	0.34
1000	79.6%	20.4%	179.5	881.6	0.4749	0.16	0.32
1025	75.8%	24.2%	218.2	902.4	0.4799	0.18	0.30
1050	71.5%	28.5%	262.7	922.8	0.4870	0.21	0.27
1075	66.8%	33.2%	313.2	943.0	0.4959	0.24	0.25
1100	61.6%	38.4%	369.4	962.3	0.5068	0.28	0.23
1125	56.1%	43.9%	431.1	981.3	0.5192	0.31	0.20
1150	50.2%	49.8%	497.6	999.7	0.5331	0.35	0.18
1175	44.2%	55.8%	567.7	1017.3	0.5480	0.39	0.16
1200	38.1%	61.9%	639.9	1033.9	0.5635	0.43	0.13
1225	32.1%	67.9%	712.6	1049.7	0.5793	0.47	0.11
1250	26.4%	73.6%	783.7	1064.4	0.5947	0.50	0.09
1275	21.0%	79.0%	851.1	1077.7	0.6094	0.54	0.07
1300	16.2%	83.8%	912.9	1089.7	0.6228	0.57	0.06
1325	12.1%	87.9%	967.5	1100.3	0.6346	0.59	0.04
1350	8.6%	91.4%	1013.7	1109.2	0.6446	0.62	0.03

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 55, el tiempo óptimo de cambio de las taloneras es de 950 horas, para una confiabilidad de 86%.

4.7.3. Pernería adapters cargador frontal Komatsu WA470-6

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 56

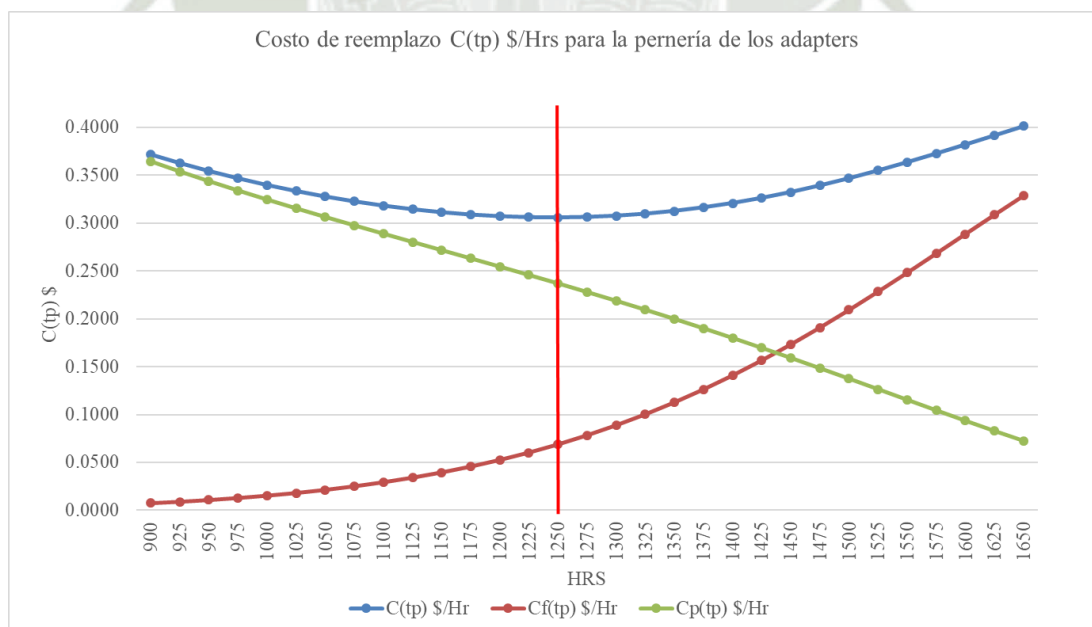
Resumen resultados cambio pernería adapters cargador frontal CF-K003

Parámetro	Datos
Media	1531.5 hrs
Beta	7.92
eta	1627.07
Cp	\$ 330.63
Cf	\$ 728.63
Costo Falla/hrs	\$ 0.476
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.306
Ahorro	35.7%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 69

Costo reemplazo C(pt) \$/hr pernería adapters cargador frontal CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 57

R(t), F(t) y C(tp) cambio pernería adapters cargador frontal CF-K003

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
900	99.1%	0.9%	7.3	798.1	0.3718	0.01	0.36
925	98.9%	1.1%	9.3	819.3	0.3628	0.01	0.35
950	98.6%	1.4%	11.8	842.8	0.3545	0.01	0.34
975	98.3%	1.7%	14.9	867.7	0.3468	0.01	0.33
1000	97.9%	2.1%	18.6	888.1	0.3398	0.02	0.32
1025	97.5%	2.5%	23.1	909.1	0.3334	0.02	0.32
1050	96.9%	3.1%	28.6	932.5	0.3276	0.02	0.31
1075	96.3%	3.7%	35.1	952.8	0.3226	0.03	0.30
1100	95.6%	4.4%	42.9	974.3	0.3181	0.03	0.29
1125	94.8%	5.2%	52.2	996.6	0.3143	0.03	0.28
1150	93.8%	6.2%	63.2	1019.0	0.3112	0.04	0.27
1175	92.7%	7.3%	76.1	1040.9	0.3087	0.05	0.26
1200	91.4%	8.6%	91.2	1063.0	0.3070	0.05	0.25
1225	90.0%	10.0%	108.7	1084.6	0.3060	0.06	0.25
1250	88.3%	11.7%	128.9	1105.9	0.3057	0.07	0.24
1275	86.5%	13.5%	152.1	1127.0	0.3062	0.08	0.23
1300	84.4%	15.6%	178.6	1148.1	0.3075	0.09	0.22
1325	82.2%	17.9%	208.8	1169.8	0.3096	0.10	0.21
1350	79.6%	20.4%	242.7	1190.5	0.3125	0.11	0.20
1375	76.8%	23.2%	280.7	1211.2	0.3163	0.13	0.19
1400	73.8%	26.2%	323.0	1231.9	0.3208	0.14	0.18
1425	70.5%	29.5%	369.6	1252.0	0.3262	0.16	0.17
1450	66.9%	33.1%	420.6	1271.9	0.3323	0.17	0.16
1475	63.1%	36.9%	475.9	1291.3	0.3392	0.19	0.15
1500	59.1%	40.9%	535.5	1310.7	0.3467	0.21	0.14
1525	55.0%	45.0%	598.8	1329.4	0.3549	0.23	0.13
1550	50.6%	49.4%	665.6	1347.8	0.3635	0.25	0.12
1575	46.2%	53.8%	735.1	1365.5	0.3726	0.27	0.10
1600	41.7%	58.3%	806.6	1382.6	0.3820	0.29	0.09
1625	37.2%	62.8%	879.2	1399.1	0.3916	0.31	0.08
1650	32.7%	67.3%	951.9	1414.8	0.4011	0.33	0.07

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 57, el tiempo óptimo de cambio de la pernería de los adapters es de 1250 horas, para una confiabilidad de 88%.

4.7.4. Pernería entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 58

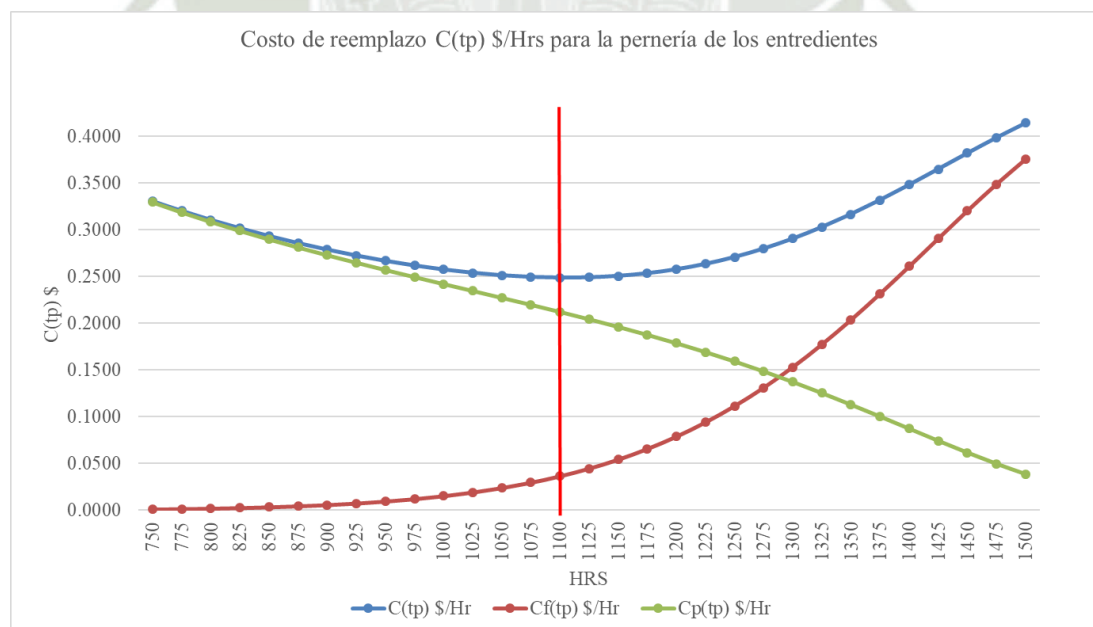
Resumen resultados cambio pernería entredientes cargador frontal CF-K003

Parámetro	Datos
Media	1368.9 hrs
Beta	10.29
eta	1437.17
Cp	\$ 247.60
Cf	\$ 645.60
Costo Falla/hrs	\$ 0.472
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.249
Ahorro	47.2%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 70

Costo reemplazo C(pt) \$/hr pernería entredientes cargador frontal CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 59
R(t), F(t) y C(tp) cambio pernería entredientes cargador frontal CF-K003

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
750	99.9%	0.1%	0.8	645.3	0.3308	0.00	0.33
775	99.8%	0.2%	1.2	690.9	0.3204	0.00	0.32
800	99.8%	0.2%	1.8	747.8	0.3107	0.00	0.31
825	99.7%	0.3%	2.5	757.0	0.3018	0.00	0.30
850	99.6%	0.5%	3.5	780.0	0.2935	0.00	0.29
875	99.4%	0.6%	4.8	794.4	0.2859	0.00	0.28
900	99.2%	0.8%	6.6	818.3	0.2789	0.01	0.27
925	98.9%	1.1%	9.0	842.8	0.2725	0.01	0.27
950	98.6%	1.4%	12.1	862.6	0.2669	0.01	0.26
975	98.2%	1.8%	16.2	886.0	0.2619	0.01	0.25
1000	97.6%	2.4%	21.6	912.9	0.2575	0.02	0.24
1025	97.0%	3.0%	28.4	934.1	0.2541	0.02	0.23
1050	96.1%	3.9%	37.1	956.4	0.2514	0.02	0.23
1075	95.1%	4.9%	48.1	978.6	0.2496	0.03	0.22
1100	93.8%	6.2%	61.9	1000.7	0.2489	0.04	0.21
1125	92.3%	7.7%	79.1	1023.1	0.2492	0.04	0.20
1150	90.4%	9.6%	100.3	1045.2	0.2507	0.05	0.20
1175	88.2%	11.8%	126.3	1067.9	0.2535	0.07	0.19
1200	85.5%	14.5%	157.7	1089.7	0.2578	0.08	0.18
1225	82.4%	17.6%	195.3	1111.3	0.2635	0.09	0.17
1250	78.8%	21.2%	239.9	1133.0	0.2709	0.11	0.16
1275	74.7%	25.3%	292.0	1154.1	0.2799	0.13	0.15
1300	70.0%	30.0%	352.1	1174.9	0.2906	0.15	0.14
1325	64.8%	35.2%	420.3	1195.2	0.3029	0.18	0.13
1350	59.1%	40.9%	496.5	1215.1	0.3168	0.20	0.11
1375	53.0%	47.0%	579.8	1234.3	0.3320	0.23	0.10
1400	46.6%	53.4%	669.0	1252.7	0.3482	0.26	0.09
1425	40.0%	60.0%	762.2	1270.4	0.3651	0.29	0.07
1450	33.4%	66.6%	856.7	1286.9	0.3821	0.32	0.06
1475	27.1%	72.9%	949.6	1302.2	0.3987	0.35	0.05
1500	21.2%	78.8%	1037.6	1316.0	0.4143	0.38	0.04

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 59, el tiempo óptimo de cambio de la pernería de los entredientes es de 1100 horas, para una confiabilidad de 94%.

4.7.5. Entredientes cargador frontal Komatsu WA470-6

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 60

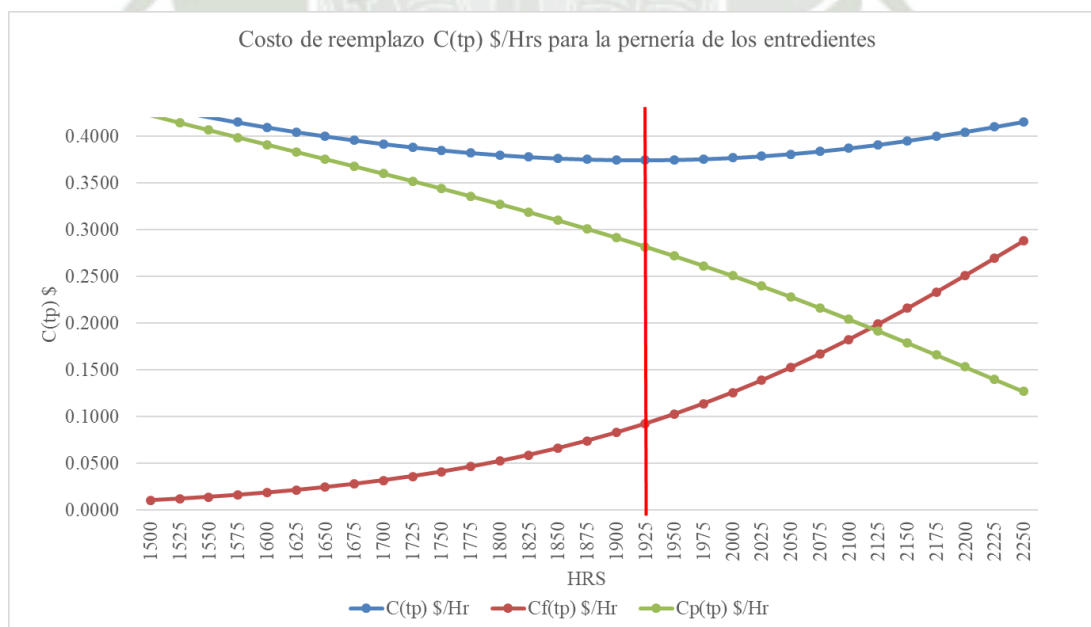
Resumen resultados cambio de entredientes cargador frontal CF-K003

Parámetro	Datos
Media	2169.1 hrs
Beta	9.98
eta	2280.18
Cp	\$ 642.58
Cf	\$ 1,040.58
Costo Falla/hrs	\$ 0.480
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.375
Ahorro	21.9%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 71

Costo reemplazo C(tp) \$/hr entredientes cargador frontal CF-K003



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 61
R(t), F(t) y C(tp) cambio de entredientes cargador frontal CF-K003

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
1500	98.5%	1.5%	20.7	1362.8	0.4330	0.01	0.42
1525	98.2%	1.8%	24.8	1386.3	0.4267	0.01	0.41
1550	97.9%	2.1%	29.6	1409.0	0.4208	0.01	0.41
1575	97.5%	2.5%	35.2	1430.9	0.4151	0.02	0.40
1600	97.1%	2.9%	41.7	1451.7	0.4098	0.02	0.39
1625	96.7%	3.4%	49.4	1476.8	0.4049	0.02	0.38
1650	96.1%	3.9%	58.2	1498.1	0.4002	0.02	0.38
1675	95.5%	4.5%	68.4	1520.1	0.3960	0.03	0.37
1700	94.8%	5.2%	80.2	1543.0	0.3920	0.03	0.36
1725	94.0%	6.0%	93.7	1564.8	0.3885	0.04	0.35
1750	93.1%	6.9%	109.3	1588.6	0.3853	0.04	0.34
1775	92.1%	7.9%	126.9	1609.6	0.3825	0.05	0.34
1800	91.0%	9.0%	147.1	1632.6	0.3801	0.05	0.33
1825	89.7%	10.3%	169.9	1654.4	0.3781	0.06	0.32
1850	88.3%	11.7%	195.7	1676.6	0.3766	0.07	0.31
1875	86.8%	13.2%	224.7	1698.4	0.3755	0.07	0.30
1900	85.0%	15.0%	257.2	1720.0	0.3748	0.08	0.29
1925	83.1%	16.9%	293.5	1741.7	0.3747	0.09	0.28
1950	81.1%	18.9%	333.9	1763.5	0.3750	0.10	0.27
1975	78.8%	21.2%	378.5	1784.7	0.3758	0.11	0.26
2000	76.3%	23.7%	427.7	1806.1	0.3771	0.13	0.25
2025	73.6%	26.4%	481.5	1827.0	0.3789	0.14	0.24
2050	70.8%	29.2%	540.1	1847.7	0.3812	0.15	0.23
2075	67.7%	32.3%	603.6	1868.2	0.3840	0.17	0.22
2100	64.4%	35.6%	671.9	1888.4	0.3873	0.18	0.20
2125	61.0%	39.0%	744.9	1908.2	0.3911	0.20	0.19
2150	57.3%	42.7%	822.3	1927.6	0.3953	0.22	0.18
2175	53.6%	46.4%	903.9	1946.8	0.3999	0.23	0.17
2200	49.7%	50.3%	989.0	1965.4	0.4048	0.25	0.15
2225	45.7%	54.3%	1077.1	1983.5	0.4101	0.27	0.14
2250	41.7%	58.3%	1167.3	2001.1	0.4156	0.29	0.13

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 61, el tiempo óptimo de cambio de los entredientes es de 1925 horas, para una confiabilidad de 83%.

4.7.6. Empaque de tapa de balancines volquete Volvo FMX 440

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 62

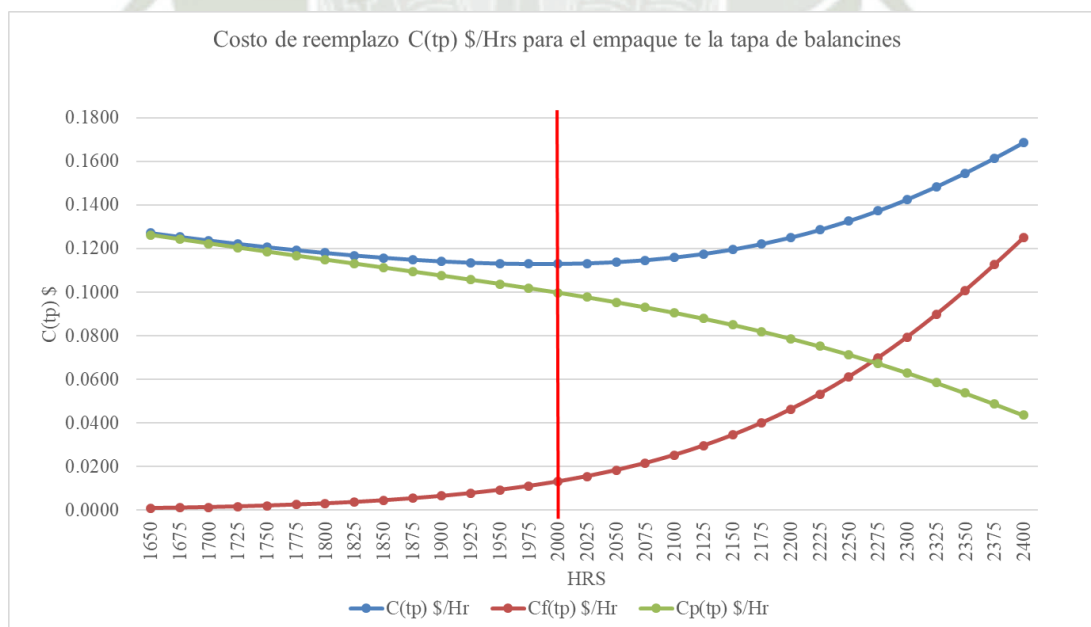
Resumen resultados cambio empaque tapa de balancines volquete CV-V005

Parámetro	Datos
Media	2366.8 hrs
Beta	14.9
eta	2451.43
Cp	\$ 208.81
Cf	\$ 556.81
Costo Falla/hrs	\$ 0.235
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.113
Ahorro	52.0%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 72

Costo reemplazo C(tp) \$/hr empaque tapa balancines volquete CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 63
R(t), F(t) y C(tp) cambio empaque tapa balancines volquete CV-V005

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
1650	99.7%	0.3%	4.2	1533.5	0.1272	0.00	0.13
1675	99.7%	0.3%	5.4	1576.4	0.1254	0.00	0.12
1700	99.6%	0.4%	6.8	1592.6	0.1237	0.00	0.12
1725	99.5%	0.5%	8.6	1621.2	0.1222	0.00	0.12
1750	99.3%	0.7%	10.8	1644.1	0.1207	0.00	0.12
1775	99.2%	0.8%	13.5	1664.9	0.1193	0.00	0.12
1800	99.0%	1.0%	16.8	1683.7	0.1180	0.00	0.11
1825	98.8%	1.2%	20.9	1707.5	0.1168	0.00	0.11
1850	98.5%	1.5%	25.9	1730.1	0.1158	0.00	0.11
1875	98.2%	1.8%	32.1	1758.5	0.1149	0.01	0.11
1900	97.8%	2.2%	39.5	1779.8	0.1141	0.01	0.11
1925	97.3%	2.7%	48.5	1802.9	0.1135	0.01	0.11
1950	96.7%	3.3%	59.4	1827.2	0.1131	0.01	0.10
1975	96.1%	3.9%	72.4	1848.4	0.1129	0.01	0.10
2000	95.3%	4.7%	88.1	1872.4	0.1129	0.01	0.10
2025	94.4%	5.6%	106.8	1895.5	0.1132	0.02	0.10
2050	93.3%	6.7%	129.1	1919.4	0.1138	0.02	0.10
2075	92.0%	8.0%	155.4	1941.9	0.1146	0.02	0.09
2100	90.5%	9.5%	186.4	1964.3	0.1159	0.03	0.09
2125	88.8%	11.2%	222.9	1987.8	0.1175	0.03	0.09
2150	86.8%	13.2%	265.4	2010.5	0.1195	0.03	0.09
2175	84.5%	15.5%	314.7	2032.9	0.1220	0.04	0.08
2200	81.9%	18.1%	371.5	2054.9	0.1250	0.05	0.08
2225	79.0%	21.0%	436.6	2077.1	0.1285	0.05	0.08
2250	75.7%	24.3%	510.5	2098.7	0.1326	0.06	0.07
2275	72.0%	28.0%	593.9	2120.5	0.1372	0.07	0.07
2300	67.9%	32.1%	686.8	2141.4	0.1425	0.08	0.06
2325	63.5%	36.5%	789.5	2162.3	0.1482	0.09	0.06
2350	58.7%	41.3%	901.5	2182.6	0.1546	0.10	0.05
2375	53.6%	46.4%	1022.2	2202.6	0.1614	0.11	0.05
2400	48.2%	51.8%	1150.1	2221.7	0.1685	0.12	0.04

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 63, el tiempo óptimo de cambio del empaque de tapa de balancines es de 2000 horas, para una confiabilidad de 95%.

4.7.7. Tubo flexible de escape largo volquete Volvo FMX 440

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 64

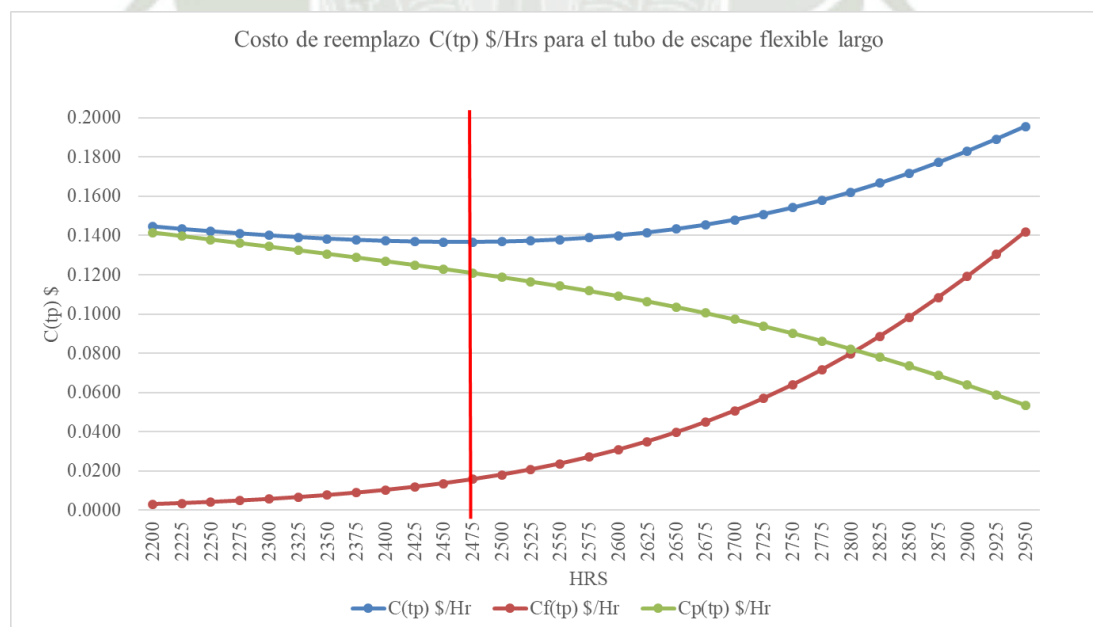
Resumen resultados cambio tubo de escape flexible largo volquete CV-V005

Parámetro	Datos
Media	2910.8 hrs
Beta	15.12
eta	3013.64
Cp	\$ 313.89
Cf	\$ 782.19
Costo Falla/hrs	\$ 0.269
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.137
Ahorro	49.1%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 73

Costo reemplazo C(tp) \$/hr tubo escape flexible largo volquete CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 65

R(t), F(t) y C(tp) cambio tubo de escape flexible largo volquete CV-V005

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
2200	99.1%	0.9%	17.6	2059.7	0.1446	0.00	0.14
2225	99.0%	1.0%	21.1	2083.2	0.1433	0.00	0.14
2250	98.8%	1.2%	25.3	2111.5	0.1421	0.00	0.14
2275	98.6%	1.4%	30.2	2135.0	0.1410	0.00	0.14
2300	98.3%	1.7%	35.9	2154.1	0.1400	0.01	0.13
2325	98.0%	2.0%	42.7	2179.0	0.1391	0.01	0.13
2350	97.7%	2.3%	50.7	2204.8	0.1383	0.01	0.13
2375	97.3%	2.7%	60.0	2227.9	0.1377	0.01	0.13
2400	96.9%	3.2%	70.8	2249.2	0.1372	0.01	0.13
2425	96.3%	3.7%	83.5	2274.1	0.1368	0.01	0.12
2450	95.7%	4.3%	98.2	2297.4	0.1367	0.01	0.12
2475	95.0%	5.0%	115.2	2319.9	0.1366	0.02	0.12
2500	94.2%	5.8%	134.9	2343.3	0.1368	0.02	0.12
2525	93.3%	6.7%	157.6	2366.5	0.1372	0.02	0.12
2550	92.3%	7.7%	183.6	2388.4	0.1379	0.02	0.11
2575	91.1%	8.9%	213.5	2411.5	0.1388	0.03	0.11
2600	89.8%	10.2%	247.7	2434.9	0.1400	0.03	0.11
2625	88.3%	11.7%	286.5	2456.9	0.1414	0.04	0.11
2650	86.7%	13.3%	330.6	2479.6	0.1432	0.04	0.10
2675	84.8%	15.2%	380.5	2502.7	0.1454	0.04	0.10
2700	82.7%	17.3%	436.5	2524.6	0.1479	0.05	0.10
2725	80.4%	19.6%	499.3	2546.9	0.1508	0.06	0.09
2750	77.8%	22.2%	569.3	2569.0	0.1541	0.06	0.09
2775	75.0%	25.0%	646.9	2590.9	0.1579	0.07	0.09
2800	72.0%	28.0%	732.3	2612.2	0.1620	0.08	0.08
2825	68.6%	31.4%	825.9	2633.6	0.1666	0.09	0.08
2850	65.1%	34.9%	927.6	2654.5	0.1717	0.10	0.07
2875	61.2%	38.8%	1037.2	2674.9	0.1771	0.11	0.07
2900	57.2%	42.8%	1154.5	2695.2	0.1829	0.12	0.06
2925	52.9%	47.1%	1278.7	2714.9	0.1891	0.13	0.06
2950	48.5%	51.5%	1408.8	2734.1	0.1956	0.14	0.05

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 65, el tiempo óptimo de cambio del tubo de escape flexible largo es de 2475 horas, para una confiabilidad de 95%.

4.7.8. Tubo flexible de escape corto volquete Volvo FMX 440

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 66

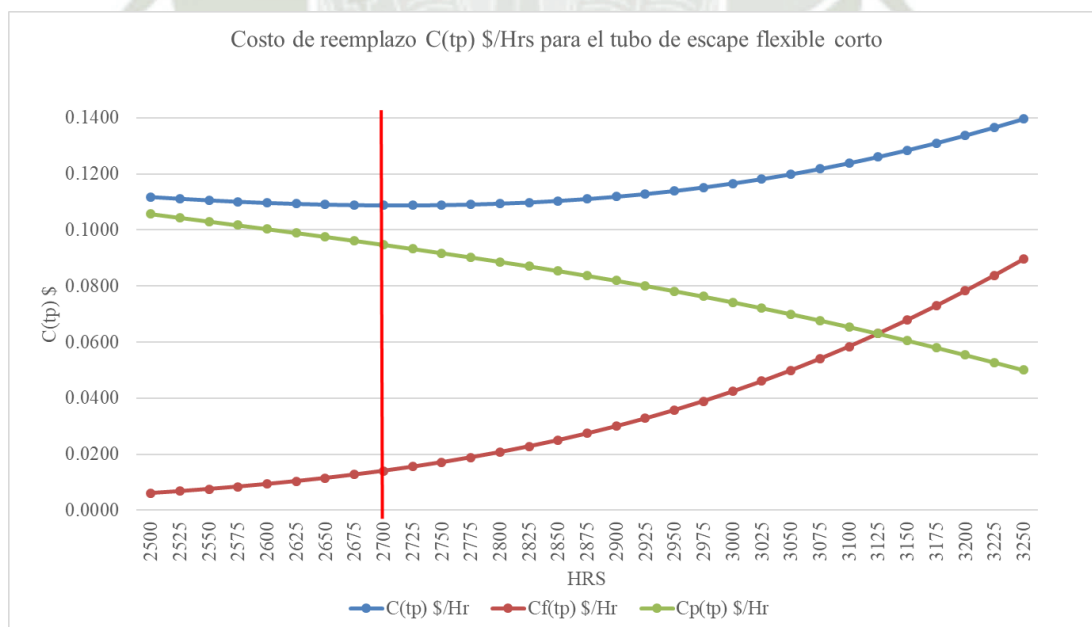
Resumen resultados cambio tubo escape flexible corto volquete CV-V005

Parámetro	Datos
Media	3276.0
Beta	12.05
eta	3418.15
Cp	\$ 269.88
Cf	\$ 667.88
Costo Falla/hrs	\$ 0.204
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.109
Ahorro	46.6%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 74

Costo reemplazo C(tp) \$/hr tubo escape flexible corto volquete CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 67
R(t), F(t) y C(tp) cambio tubo escape flexible corto volquete CV-V005

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
2500	97.7%	2.3%	52.6	2306.7	0.1118	0.01	0.11
2525	97.4%	2.6%	59.8	2329.5	0.1112	0.01	0.10
2550	97.1%	2.9%	67.9	2352.8	0.1106	0.01	0.10
2575	96.8%	3.2%	77.0	2376.5	0.1101	0.01	0.10
2600	96.4%	3.6%	87.1	2397.6	0.1097	0.01	0.10
2625	95.9%	4.1%	98.5	2421.6	0.1093	0.01	0.10
2650	95.5%	4.6%	111.2	2444.8	0.1091	0.01	0.10
2675	94.9%	5.1%	125.3	2466.9	0.1089	0.01	0.10
2700	94.3%	5.7%	141.1	2491.0	0.1088	0.01	0.09
2725	93.7%	6.3%	158.5	2512.6	0.1088	0.02	0.09
2750	93.0%	7.0%	177.9	2535.7	0.1089	0.02	0.09
2775	92.2%	7.8%	199.3	2557.8	0.1091	0.02	0.09
2800	91.4%	8.6%	223.0	2580.5	0.1094	0.02	0.09
2825	90.4%	9.6%	249.1	2602.8	0.1098	0.02	0.09
2850	89.4%	10.6%	277.9	2625.8	0.1104	0.03	0.09
2875	88.3%	11.7%	309.5	2648.3	0.1111	0.03	0.08
2900	87.1%	12.9%	344.1	2670.4	0.1119	0.03	0.08
2925	85.8%	14.2%	381.9	2692.2	0.1128	0.03	0.08
2950	84.4%	15.6%	423.3	2715.0	0.1139	0.04	0.08
2975	82.9%	17.1%	468.2	2736.6	0.1152	0.04	0.08
3000	81.3%	18.7%	517.0	2758.4	0.1166	0.04	0.07
3025	79.5%	20.5%	569.9	2780.3	0.1181	0.05	0.07
3050	77.6%	22.4%	627.0	2802.1	0.1199	0.05	0.07
3075	75.6%	24.4%	688.4	2823.4	0.1218	0.05	0.07
3100	73.5%	26.5%	754.3	2844.5	0.1238	0.06	0.07
3125	71.2%	28.8%	824.8	2865.6	0.1260	0.06	0.06
3150	68.8%	31.2%	900.0	2886.7	0.1284	0.07	0.06
3175	66.3%	33.7%	979.8	2907.4	0.1310	0.07	0.06
3200	63.7%	36.4%	1064.1	2927.6	0.1337	0.08	0.06
3225	60.9%	39.1%	1153.0	2947.9	0.1365	0.08	0.05
3250	58.0%	42.0%	1246.1	2967.8	0.1395	0.09	0.05

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 67, el tiempo óptimo de cambio del tubo de escape flexible corto es de 2700 horas, para una confiabilidad de 94%.

4.7.9. Correa del ventilador volquete Volvo FMX 440

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 68

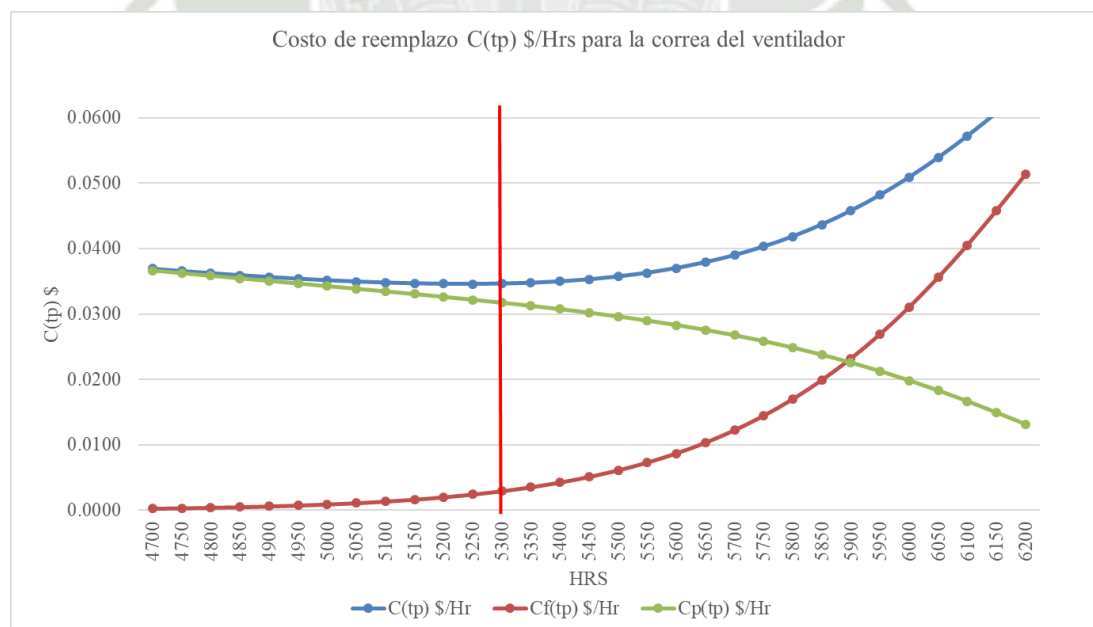
Resumen resultados cambio correa del ventilador volquete CV-V005

Parámetro	Datos
Media	6115.8 hrs
Beta	21.34
eta	6272.44
Cp	\$ 172.62
Cf	\$ 570.62
Costo Falla/hrs	\$ 0.093
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.035
Ahorro	62.9%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 75

Costo reemplazo C(pt) \$/hr correa del ventilador volquete CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 69

R(t), F(t) y C(tp) cambio correa del ventilador volquete CV-V005

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
4700	99.8%	0.2%	9.5	4496.9	0.0369	0.00	0.04
4750	99.7%	0.3%	12.0	4533.3	0.0366	0.00	0.04
4800	99.7%	0.3%	15.2	4593.8	0.0362	0.00	0.04
4850	99.6%	0.4%	19.1	4629.1	0.0359	0.00	0.04
4900	99.5%	0.5%	24.0	4675.6	0.0357	0.00	0.04
4950	99.4%	0.6%	30.1	4724.7	0.0354	0.00	0.03
5000	99.2%	0.8%	37.7	4779.0	0.0352	0.00	0.03
5050	99.0%	1.0%	47.0	4822.6	0.0350	0.00	0.03
5100	98.8%	1.2%	58.5	4870.0	0.0348	0.00	0.03
5150	98.5%	1.5%	72.7	4921.4	0.0347	0.00	0.03
5200	98.2%	1.8%	90.0	4965.8	0.0346	0.00	0.03
5250	97.8%	2.2%	111.2	5012.6	0.0346	0.00	0.03
5300	97.3%	2.7%	137.1	5061.0	0.0346	0.00	0.03
5350	96.7%	3.3%	168.6	5109.2	0.0348	0.00	0.03
5400	96.0%	4.0%	206.7	5154.8	0.0350	0.00	0.03
5450	95.1%	4.9%	252.9	5203.7	0.0353	0.01	0.03
5500	94.1%	5.9%	308.4	5249.9	0.0357	0.01	0.03
5550	92.9%	7.1%	375.1	5297.6	0.0363	0.01	0.03
5600	91.5%	8.5%	454.7	5343.9	0.0370	0.01	0.03
5650	89.8%	10.2%	549.4	5390.2	0.0379	0.01	0.03
5700	87.8%	12.2%	661.5	5436.6	0.0390	0.01	0.03
5750	85.5%	14.5%	793.4	5482.5	0.0403	0.01	0.03
5800	82.9%	17.1%	947.7	5528.5	0.0419	0.02	0.02
5850	79.8%	20.2%	1126.7	5573.4	0.0437	0.02	0.02
5900	76.3%	23.7%	1332.9	5618.1	0.0458	0.02	0.02
5950	72.3%	27.7%	1568.1	5662.2	0.0482	0.03	0.02
6000	67.9%	32.1%	1833.5	5705.5	0.0509	0.03	0.02
6050	63.0%	37.1%	2129.4	5748.0	0.0539	0.04	0.02
6100	57.6%	42.4%	2454.6	5789.3	0.0572	0.04	0.02
6150	51.9%	48.1%	2806.2	5829.4	0.0607	0.05	0.01
6200	45.8%	54.2%	3179.2	5867.9	0.0645	0.05	0.01

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 69, el tiempo óptimo de cambio de la correa del ventilador es de 5300 horas, para una confiabilidad de 97%.

4.7.10. Válvula de freno de motor volquete Volvo FMX 440

Hacemos el ingreso de los parámetros de la distribución de falla obtenidos en Minitab y la matriz de datos de Matlab a la hoja de cálculo del anexo 1.

Tabla 70

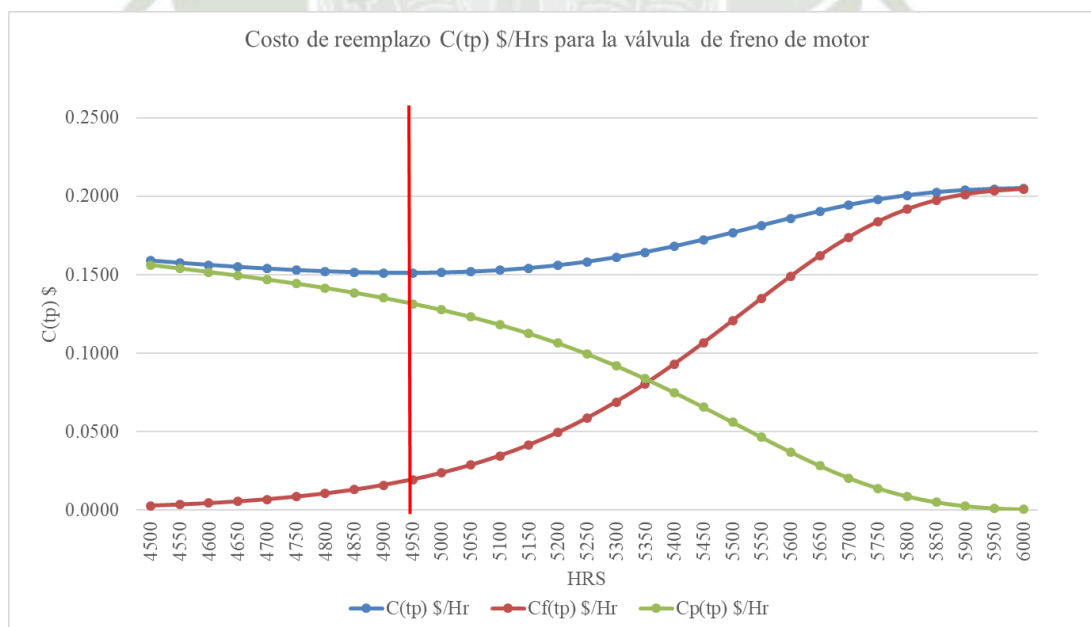
Resumen resultados cambio válvula freno de motor volquete CV-V005

Parámetro	Datos
Media	5398.9
Beta	21.38
eta	5536.88
Cp	\$ 710.64
Cf	\$ 1,108.64
Costo Falla/hrs	\$ 0.205
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.151
Ahorro	26.4%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 76

Costo reemplazo C(tp) \$/hr válvula freno de motor volquete CV-V005



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 71
R(t), F(t) y C(tp) cambio válvula freno de motor volquete CV-V005

T (Hr)	R(t)	F(t)	$\int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt$	M(tp)	C(tp) \$/Hr	Cf(tp) \$/Hr	Cp(tp) \$/Hr
4500	98.8%	1.2%	50.7	4294.5	0.1590	0.00	0.16
4550	98.5%	1.5%	64.9	4347.4	0.1576	0.00	0.15
4600	98.1%	1.9%	82.7	4394.1	0.1562	0.00	0.15
4650	97.6%	2.4%	105.1	4442.8	0.1550	0.01	0.15
4700	97.0%	3.0%	133.1	4490.1	0.1539	0.01	0.15
4750	96.3%	3.7%	168.0	4537.1	0.1530	0.01	0.14
4800	95.4%	4.6%	211.3	4583.3	0.1522	0.01	0.14
4850	94.3%	5.7%	264.9	4630.8	0.1516	0.01	0.14
4900	92.9%	7.1%	330.8	4677.5	0.1513	0.02	0.14
4950	91.3%	8.7%	411.4	4723.4	0.1512	0.02	0.13
5000	89.3%	10.7%	509.6	4770.5	0.1514	0.02	0.13
5050	87.0%	13.0%	628.2	4816.5	0.1519	0.03	0.12
5100	84.2%	15.9%	770.5	4862.4	0.1528	0.03	0.12
5150	80.9%	19.2%	939.7	4907.9	0.1542	0.04	0.11
5200	77.0%	23.0%	1138.9	4952.8	0.1560	0.05	0.11
5250	72.6%	27.4%	1370.6	4996.6	0.1582	0.06	0.10
5300	67.5%	32.5%	1636.7	5040.1	0.1610	0.07	0.09
5350	61.9%	38.1%	1937.3	5082.3	0.1643	0.08	0.08
5400	55.7%	44.3%	2270.7	5123.4	0.1681	0.09	0.07
5450	49.0%	51.0%	2632.4	5162.8	0.1723	0.11	0.07
5500	42.0%	58.0%	3014.8	5200.4	0.1767	0.12	0.06
5550	34.9%	65.1%	3407.1	5235.8	0.1814	0.13	0.05
5600	28.0%	72.0%	3795.3	5268.6	0.1860	0.15	0.04
5650	21.4%	78.6%	4163.5	5298.3	0.1904	0.16	0.03
5700	15.6%	84.4%	4495.8	5324.4	0.1945	0.17	0.02
5750	10.6%	89.4%	4778.6	5346.5	0.1979	0.18	0.01
5800	6.7%	93.3%	5003.1	5364.2	0.2006	0.19	0.01
5850	3.9%	96.1%	5167.5	5377.7	0.2026	0.20	0.01
5900	2.0%	98.0%	5276.9	5387.2	0.2039	0.20	0.00
5950	0.9%	99.1%	5341.9	5393.1	0.2047	0.20	0.00
6000	0.4%	99.6%	5375.9	5396.5	0.2051	0.20	0.00

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la Tabla 71, el tiempo óptimo de cambio de la válvula de freno de motor es de 4950 horas, para una confiabilidad de 91%.

4.8. Plan de mantenimiento resumen

En las Tablas 72 y 73 se muestran los resúmenes de los cambios de componentes para el cargador frontal Komatsu WA-470-6 y el camión volquete FMX-440, Con la finalidad de la evaluación de la efectividad de las soluciones como mejora continua, en los anexos 3 y 4 se ha implementado los formatos el control y seguimiento de cambio de componentes.

Tabla 72

Frecuencia de cambio de componentes para el cargador frontal WA470-6

Item	Componente	Frecuencia de cambio	Confiabilidad
1	Uñas	440	Hrs 67.0%
2	Taloneras	950	Hrs 85.9%
3	Pernería de adapters	1250	Hrs 88.3%
4	Pernería de entredientes	1100	Hrs 93.4%
5	Entredientes	1925	Hrs 83.1%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 73

Frecuencia de cambio de componentes para el camión volquete FMX-440

Item	Componente	Frecuencia de cambio	Confiabilidad
1	Empaque de tapa de balancines	2000	Hrs 95.3%
2	Tubo de escape flexible largo	2475	Hrs 95.0%
3	Tubo de escape flexible Corto	2700	Hrs 94.3%
4	Correa de ventilador	5300	Hrs 97.3%
5	Válvula de freno de motor	4950	Hrs 91.3%

Fuente: Elaboración Propia.

Conclusiones

1. Con la implementación de ingeniería de confiabilidad para optimizar los planes de gestión mantenimiento en las frecuencias de cambio de componentes se concluye que, aplicando el análisis de confiabilidad y los costos asociados para un cambio preventivo o correctivo, se puede tener un ahorro promedio de 20.8% si solo se analizaría el cambio mediante el TPO y una confiabilidad promedio de 89%.
2. En la evaluación del sistema de gestión de mantenimiento se obtuvo que, la disponibilidad mecánica promedio es de 91.6%, el TPFS promedio es 5.7 horas, el TPO promedio es de 110 horas y la frecuencia de falla promedio es de 0.010 fallas/hora. La compañía solo analiza la disponibilidad mecánica como único indicador.
3. Con el desarrollo del cuadro de mando integral se alinean los objetivos estratégicos y la misión de la empresa en un conjunto de medidas y objetivos cuantificables mediante KPI's, lo que permitirá identificar las áreas problemáticas y oportunidades de mejora en la gestión del mantenimiento, enfocadas en 4 perspectivas: Financieras, Cliente, procesos internos y de aprendizaje y crecimiento.
4. El análisis de criticidad realizado a la flota de equipo pesado mediante el diagrama de Jack Knife, se concluye que los equipos más críticos son el cargador frontal CF-K003 y el camión volquete CV-V005. El cargador frontal CF-K003 tiene como sistemas críticos el sistema eléctrico y el bucket. El camión volquete CV-V005 tiene como sistemas críticos el motor y el sistema eléctrico.
5. En el análisis de criticidad de componentes para el cargador frontal CF-K003 del Bucket son: las uñas, entredientes, taloneras, pernería de adapters y pernería de entredientes. Para el Sistema Motor del Camión volquete CV-V005 son: empaque de tapa de balancines, tubo flexible de escape largo, tubo flexible de escape corto, correa del ventilador y válvula de freno de motor.
6. El modelo matemático desarrollado para el cambio óptimo de componentes mediante el análisis de confiabilidad, dieron como resultados para el cambio de uñas un tiempo de cambio óptimo de 440 Horas con una confiabilidad de 67%, dando como ahorro si solo se analizara el TPO del 8.3%. Si el tiempo de cambio se reduce a 390 horas, la confiabilidad incrementa a 90.2% y el ahorro se reduce a 4.5%. Se opta por el primer resultado y un análisis posterior en 6 meses. En el anexo 2 se muestra el resumen de los resultados del modelo matemático.

Recomendaciones

1. Se recomienda asignar un presupuesto específico para la capacitación al personal en ingeniería de confiabilidad.
2. Se recomienda documentar los reportes de fallas en un sistema computarizado específicamente para mantenimiento, donde se registre por equipo, sistema y componente, el horómetro y/o kilometraje junto a la fecha y hora de ocurrencia de falla.
3. Se recomienda que dentro del cuadro de mando integral se especifiquen los objetivos estratégicos que se puedan cumplir a la realidad de la gestión de la empresa y el compromiso de cumplimiento de todas las áreas.
4. Se recomienda para el análisis de confiabilidad y frecuencia optima de cambio de componentes, asignar una computadora con las características necesarias para el uso de Minitab y Matlab.
5. Se recomienda documentar y establecer como política de mantenimiento los resultados obtenidos para la evaluación semestral como proceso de mejora continua.

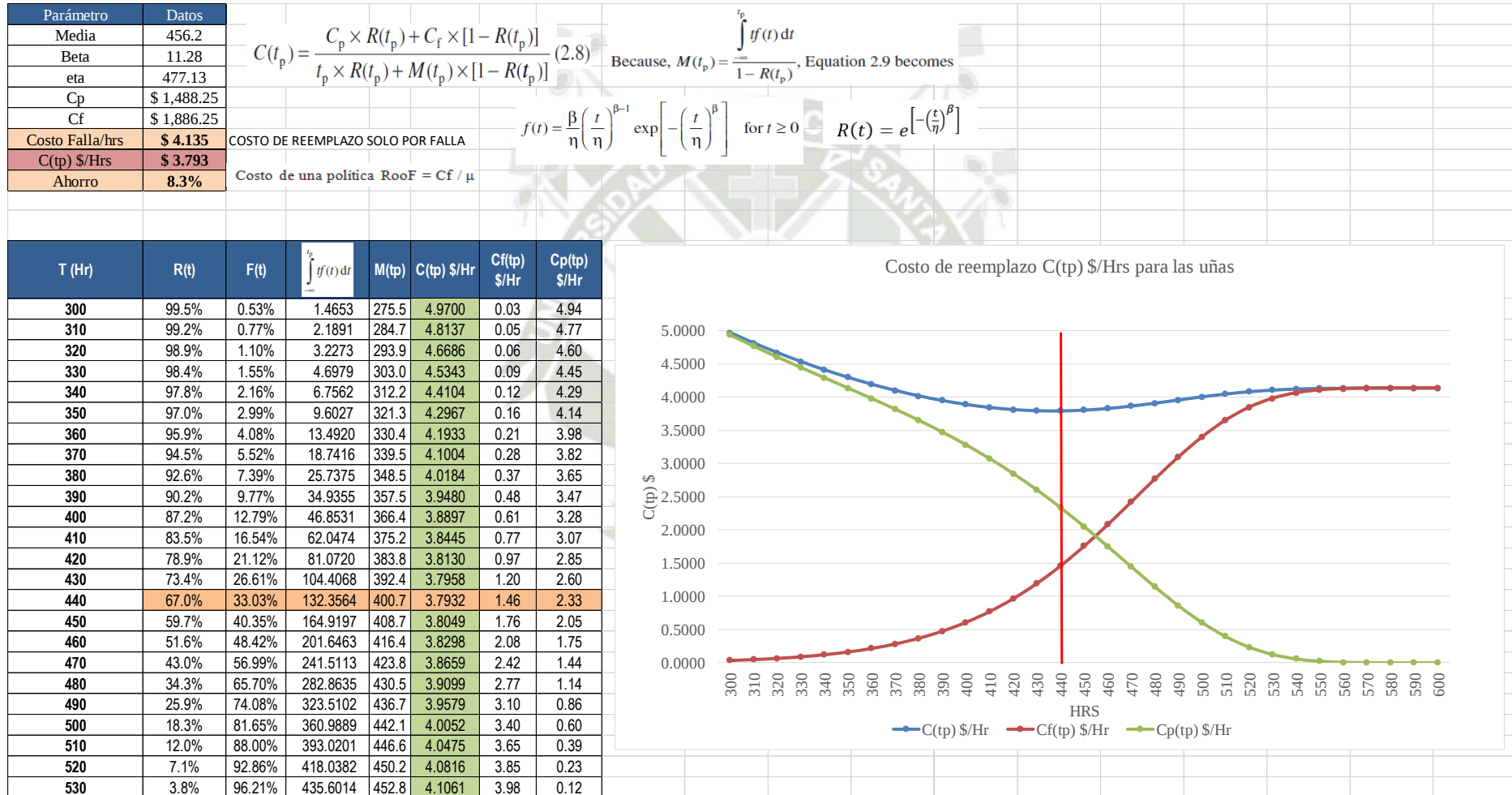
Bibliografía

- Abernethy, R. B. (2006). *The New Weibull Handbook*. Florida, EE. UU.: SAE.
- Arbelaez G., M. (2006). *Pronóstico de Fallas de Sistemas Reparables Utilizando Redes Neuronales Artificiales*. Artículo, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, Pereira.
- Broemm, W., Ellner, P., & Woodworth, J. (2000). *AMSAA Reliability Growth Guide*. Wahington DC 20503.
- Campbell, J. (1995). *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*. Portland: OR: Productivity Press.
- Comerford, A. (2005). *Crow/AMSAA Reliability Growth Plots And there use in Interpreting Meridian Energy Ltd's, Main Unit Failure Data*. Areva T&D New Zealand, Rotorua.
- Figuerola Barra, J. C. (2014). *Estudio de Mantenimiento basado en la confiabilidad acorde al sistema Asset Management aplicado a la flota de bulldozer CAT D10T, minera Anglo American operación Mantoverde*. Tesis de Grado, UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO, Departamento de Ingeniería Mecánica, Concepción.
- Fuenmayor, E. (n.d.). *Cálculo de la frecuencia óptima de mantenimiento o reemplazo preventivo- Caso de Estudio Basado en Métodos Y Normas Vigentes*. Perú.
- Gonzales Fernández, F. J. (2004). *Auditoría del manetenimiento e indicadores de gestión* (Primera edición ed.). Madrid: Ed. Artegraf S.A.
- ISO 55000. (2012). *ISO 55000. Asset management Overview, principles and terminology*, 25. Ginebra.
- Jardine, A. K., & Tsang, A. H. (2014). *Maintenance, Replacement and Reability (Theory and Applications)*. Toronto: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- Martón, I., Martorell, S., Sánchez, A., & Fernández, A. (2012). XVI Congreso de Confiabilidad. *APLICACIÓN DEL MÉTODO CROW-AMSAA EN LA PLANIFICACIÓN*. Valencia, España.
- Mora Gutierrez, A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, Ejecución y Control*. Mexico: Alfaomega Grupo Editor, S.A.

- Morales Retamal, S. (2017). *Generación y Desarrollo de un plan de Mantenimiento Preventivo en base a la criticidad, según criterios de estadística de fallas en la empresa QUIMICA CLARINT*. Tesis de Grado, UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Valparaíso.
- Murillo, W. M. (n.d.). *The CROW AMSAA - DUANE Reliability Growth Model*.
- Navas Alvarez, M. A. (2017). *Estudio de la Fiabilidad de los sistemas reparables y desarrollo de un procedimiento de análisis Multivariable*. Tesis doctoral, UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA, Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
- Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos* (Segunda edición ed.). Sevilla, España.
- Pascual J., R. (2005). *El arte de Mantener*. Santiago, Chile.
- Torres Seguil, D. (2014). *Evaluación de costos de Mantenimiento correctivo para determinar el tiempo óptimo de reemplazo de los Volquetes FAW CA3256 en ICCGSA*. Tesis de Grado, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, Facultad de Ingeniería Mecánica, Huancayo.
- US Department of Defence. (2011). *Military Handbook – 189C Reliability Growth Management*. EE. UU.
- Vergara Lazcano, R. (2014). *La estadística en el Mantenimiento y reemplazo óptimo en el control de calidad*. Tesis de Grado, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, División de ciencias básicas e Ingenierías, Iztapalapa.

Anexos

Anexo 1 Plantilla de cálculo



Anexo 2 Resumen de resultados

CARGADOR FRONTAL WA470-6 - BUCKET									
Uñas		Taloneras		Pernería adapter		Pernería entrediente		Entredientes	
Parámetro	Datos	Parámetro	Datos	Parámetro	Datos	Parámetro	Datos	Parámetro	Datos
Media	456.2	Media	1134.7	Media	1531.5	Media	1368.9	Media	2169.1
Beta	11.28	Beta	7.92	Beta	7.92	Beta	10.29	Beta	9.98
eta	477.13	eta	1205.46	eta	1627.07	eta	1437.17	eta	2280.18
Cp	\$ 1,488.25	Cp	\$ 387.48	Cp	\$ 330.63	Cp	\$ 247.60	Cp	\$ 642.58
Cf	\$ 1,886.25	Cf	\$ 760.48	Cf	\$ 728.63	Cf	\$ 645.60	Cf	\$ 1,040.58
Costo Falla/hrs	\$ 4.135	Costo Falla/hrs	\$ 0.670	Costo Falla/hrs	\$ 0.476	Costo Falla/hrs	\$ 0.472	Costo Falla/hrs	\$ 0.480
C(tp) \$/Hrs	\$ 3.793	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.471	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.306	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.249	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.375
Ahorro	8.3%	Ahorro	29.8%	Ahorro	35.7%	Ahorro	47.2%	Ahorro	21.9%
Tp	440	Tp	950	Tp	1250	Tp	1100	Tp	1925
R(T)	67.0%	R(T)	85.9%	R(T)	88.3%	R(T)	93.4%	R(T)	83.1%
Tp	390	Tp	900	Tp	1200	Tp	1075	Tp	1800
R(T)	90.2%	R(T)	90.6%	R(T)	91.4%	R(T)	95.1%	R(T)	91.0%
C(tp) \$/Hrs	\$ 3.948	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.475	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.307	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.250	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.380
Ahorro	4.5%	Ahorro	29.2%	Ahorro	35.5%	Ahorro	47.1%	Ahorro	20.8%
CAMIÓN VOLQUETE FMX440 - MOTOR									
Empaque balancines		Tubo de escape largo		Tubo de escape corto		Correa del ventilador		Vlavlula de freno de motor	
Parámetro	Datos	Parámetro	Datos	Parámetro	Datos	Parámetro	Datos	Parámetro	Datos
Media	2366.8	Media	2910.8	Media	3276.0	Media	6115.8	Media	5398.9
Beta	14.9	Beta	15.12	Beta	12.05	Beta	21.34	Beta	21.38
eta	2451.43	eta	3013.64	eta	3418.15	eta	6272.44	eta	5536.88
Cp	\$ 208.81	Cp	\$ 313.89	Cp	\$ 269.88	Cp	\$ 172.62	Cp	\$ 710.64
Cf	\$ 556.81	Cf	\$ 782.19	Cf	\$ 667.88	Cf	\$ 570.62	Cf	\$ 1,108.64
Costo Falla/hrs	\$ 0.235	Costo Falla/hrs	\$ 0.269	Costo Falla/hrs	\$ 0.204	Costo Falla/hrs	\$ 0.093	Costo Falla/hrs	\$ 0.205
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.113	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.137	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.109	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.035	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.151
Ahorro	52.0%	Ahorro	49.1%	Ahorro	46.6%	Ahorro	62.9%	Ahorro	26.4%
Tp	2000	Tp	2475	Tp	2700	Tp	5300	Tp	4950
R(T)	95.3%	R(T)	95.0%	R(T)	94.3%	R(T)	97.3%	R(T)	91.3%
Tp	2100	Tp	2600	Tp	2800	Tp	5600	Tp	4800
R(T)	90.5%	R(T)	90.0%	R(T)	91.4%	R(T)	91.5%	R(T)	95.4%
C(tp) \$/Hrs	\$ 0.116	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.140	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.109	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.037	C(tp) \$/Hrs	\$ 0.152
Ahorro	50.7%	Ahorro	47.9%	Ahorro	46.3%	Ahorro	60.3%	Ahorro	25.9%

Anexo 3 Programa de mantenimiento componentes FMX-440

		FORMATO				MT-F-016	
		PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO COMPONENTES FMX-440				VERSIÓN	00
						FECHA	10/10/2023
						APRUEBA	GM

PROYECTO:		HR:	
EQUIPO:		KM:	
MARCA:		PLACA:	
AÑO:		MODELO:	
CÓDIGO EQUIPO:		N° SERIE:	

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
EMPAQUE DE TAPA DE BALANCINES	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
TUBO FLEXIBLE DE ESCAPE LARGO	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
TUBO FLEXIBLE DE ESCAPE CORTO	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
CORREA DE VENTILADOR	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
VÁLVULA DE FRENO DE MOTOR	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

Anexo 4 Programa de mantenimiento componentes WA470-6

		FORMATO				MT-F-016	
		PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO COMPONENTES WA470-6				VERSIÓN	00
						FECHA	10/10/2023
						APRUEBA	GM
PROYECTO:		HR:					
EQUIPO:		KM:					
MARCA:		PLACA:					
AÑO:		MODELO:					
CÓDIGO EQUIPO:		N° SERIE:					

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
UNAS	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
TALONERAS	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
PERNERÍA DE ADAPTERS	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
PERNERÍA DE ENTREDIENTES	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												

COMPONENTE	PRIMER CAMBIO		SEGUNDO CAMBIO		TERCER CAMBIO		CUARTO CAMBIO		QUINTO CAMBIO		SEXTO CAMBIO	
ENTREDIENTES	HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:		HRS:	
	PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:		PROXIMO:	
Observaciones:												