

Universidad Católica de Santa María

Escuela de Postgrado

Maestría en Ingeniería de Mantenimiento



**“EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE ESTRATEGIAS DE
MANTENIMIENTO APLICABLES A UNA FLOTA DE CAMIONES MINEROS
797F EN UNA OPERACIÓN MINERA AL SUR DEL PERÚ”**

Tesis presentada por el Bachiller:

Villanueva Paredes, Luis Michael

Para optar el Grado Académico de:

Maestro en Ingeniería de Mantenimiento

Asesor:

Dr. Pacheco Oviedo, Abraham

Arequipa – Perú

2019

Informe 2019

De: Ing. Edwing Ticse Villanueva
A: Dr. José Villanueva Salas
Director de la Escuela de Post Grado de la UCSM
Asunto: Borrador de tesis del Bachiller Luis Michael Villanueva Paredes
Fecha: 11-06-2019

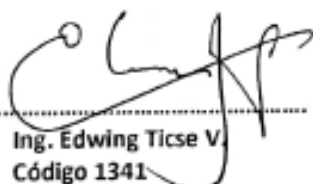
Mediante la presente manifiesto que se ha revisado el Borrador de Tesis de la Sr. Luis Michael Villanueva Paredes titulado:

Evaluación técnico-financiera de estrategias de mantenimiento aplicables a una flota de camiones mineros 797F en una operación minera al sur del Perú

Luego de analizarlo se dá por **APROBADO** dicho borrador de Tesis

Agradeciendo la atención prestada a la presente, le expreso a usted mis sentimientos de estima personal.

Atentamente



Ing. Edwing Ticse V.
Código 1341



DICTAMEN BORRADOR DE TESIS

A: *Dr. José Villanueva Salas*
Director de la Escuela de Postgrado

De: *Doctor Abraham A. Pacheco Oviedo*
Miembro del Jurado Dictaminador.

Asunto: *Dictamen del Borrador de Tesis: EVALUACION TECNICO-FINANCIERA DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO APLICABLES A UNA FLOTA DE CAMIONES MINEROS 797F EN UNA OPERACIÓN MINERA AL SUR DEL PERU.*

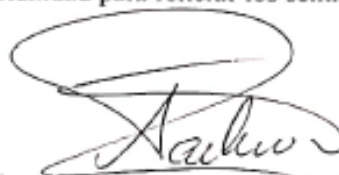
Magister: VILLANUEVA PAREDES, Luis Michael

Fecha: *Arequipa 08 de Julio del 2019.*

Revisado lo presentado considero subsanadas las observaciones del borrador de Tesis, por lo que soy de la opinión que pase a la siguiente etapa, salvo mejor parecer.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterar los sentimientos de mi mayor consideración.

Atentamente,



Ing. Abraham A. Pacheco Oviedo



DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 27 de Mayo de 2019

Señora Doctora
Teresa Chocano Rosas
Directora de la Escuela de Postgrado de la Universidad Católica de Santa María
Ciudad.-

De mi consideración:

Dictamen sobre el Proyecto de Tesis de Maestría titulado "EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO APLICABLES A UNA FLOTA DE CAMIONES MINEROS 797F EN UNA OPERACIÓN MINERA AL SUR DEL PERÚ", presentado por el Bachiller VILLANUEVA PAREDES, Luis Michael, con el que pretende optar el grado académico de MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO.

Después de haber cumplido con el levantamiento de mis observaciones, el dictamen es:

APROBADO

Atentamente,



Dr. Ing. Rofardi M. Valencia Becerra
COD. 1780



A mis padres, que con su ejemplo contribuyeron a mi formación como hombre

y a mis hermanos, por su incondicional apoyo.

ÍNDICE

Resumen	
Abstract	
Introducción	16
CAPÍTULO I: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	18
1. Planteamiento teórico de la investigación.....	18
1.1 Identificación del problema	18
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo general.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Alcances.....	20
1.4 Antecedentes.....	20
1.4.1 Antecedente I.....	20
1.4.2 Antecedente II.....	21
1.4.3 Antecedente III.....	21
1.4.4 Antecedente IV	22
1.5 Hipótesis	23
1.5.1 General	23
1.5.2 Nula	23
1.6 Variables.....	23
1.7 Marco metodológico	26
1.7.1 Definición del alcance	26
1.7.2 Diseño de la investigación.....	26
2. Planteamiento operacional.....	26
2.1 Técnicas	26

2.2	Instrumentos.....	27
2.3	Campo de verificación.....	27
2.4	Estrategia	28
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO		29
1.	Tipos de mantenimiento.....	29
1.1	Mantenimiento correctivo.....	29
1.2	Mantenimiento preventivo.....	29
1.3	Mantenimiento predictivo.....	30
1.4	Mantenimiento cero horas (overhaul)	30
1.5	Mantenimiento en uso	30
2.	Modelos de mantenimiento	31
1.6	Modelo correctivo	31
1.7	Modelo condicional.....	31
1.8	Modelo sistemático	32
1.9	Modelo de mantenimiento de alta disponibilidad	33
3.	Confiabilidad.....	34
1.10	Definición.....	34
1.11	Fórmula de cálculo.....	34
4.	Disponibilidad	34
4.1	Definición.....	34
4.2	Fórmula de cálculo	34
5.	Análisis de criticidad	35
5.1	Importancia del análisis de criticidad en la industria minera.	35
5.2	Principio de Pareto	36
5.3	Diagrama Jack-Knife.....	37
5.4	Impacto del método dentro de una organización de mantenimiento.....	38

6. Análisis de Weibull.....	39
6.1 Efecto del parámetro de forma.....	39
6.2 Efecto del parámetro de escala	40
6.3 Efecto del parámetro de valor umbral	41
7. Análisis de Crow-AMSA.....	41
CAPITULO III: CAMION MINERO 797F	43
I. ESPECIFICACIONES.....	43
1. Generales	43
1.1 Tren de fuerza.....	43
1.2 Peso y diseño estructural.....	43
1.3 Transmisión.....	44
1.4 Convertidor de par.....	45
1.5 Diferencial.....	45
1.6 Mandos finales	45
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	49
1. Estrategia actual.....	49
2. Evaluación de indicadores de mantenimiento	50
2.1 Disponibilidad.....	50
2.2 MTTR.....	51
2.3 MTBF	52
2.4 MTFS APM	53
3. Utilización.....	53
4. TAT y Lead times.....	54
5. Estado de componentes	54
5.1 Parámetros beta de los componentes.....	54
5.2 Inventario actual de los componentes de tren de fuerza.....	55

6. Costos de posesión y operación por equipo.	55
7. Costo de mantenimiento por equipo.	57
CAPITULO V: EVALUACION DE ESTRATEGIAS APLICABLES	59
1. Estrategia correctiva	59
1.1 Contexto.....	59
1.2 Análisis por componente	59
1.2.1 Motor.....	59
1.2.2 Transmisión	61
1.2.3 Convertidor.....	63
1.2.4 Diferencial	65
1.2.5 Mandos finales.....	67
1.3 Impacto.....	69
1.4 Proyección de costos	73
2. Estrategia condicional.....	74
2.1 Procedimiento de cálculo de la frecuencia de inspección	76
2.2 Cálculo de la frecuencia de inspección	77
2.2.1 Cálculo de la frecuencia de inspección Motor.....	77
2.2.2 Cálculo de la frecuencia de inspección Transmisión	78
2.2.3 Cálculo de la frecuencia de inspección Convertidor.....	79
2.2.4 Cálculo de la frecuencia de inspección Diferencial	80
2.2.5 Cálculo de la frecuencia de inspección Mando Final.....	82
2.3 Impacto.....	83
2.4 Proyección de costos	84
3. Estrategia sistemática.....	85
3.1 Análisis de ciclo de vida de motor	85
3.2 Análisis de ciclo de vida de transmisión	88

3.3	Análisis de ciclo de vida de convertidor.....	88
3.4	Análisis de ciclo de vida de diferencial.....	88
3.5	Análisis de ciclo de vida de mando final.....	88
3.6	Proyección de costos	99
4.	Estrategia de alta disponibilidad	100
4.1	Cálculo de componentes para una alta disponibilidad	100
5.	Estrategia aplicando ingeniería de confiabilidad	101
5.1	Identificación de fallas funcionales.....	101
5.2	Identificación de modos de falla	107
5.3	FMEA modificado	152
5.4	Análisis causa raíz (ACR)	190
5.4.1	Análisis de comportamiento de ratios de disponibilidad.....	191
5.5	Desarrollo de árbol lógico y prueba de hipótesis	200
5.6	Plan de acción	201
5.7	Impacto	202
	CAPITULO VI: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	203
1.	Presentación de resultados.....	203
2.	Prueba de hipótesis.....	204
3.	Aportes y aplicaciones.....	204
	CONCLUSIONES.....	205
	RECOMENDACIONES	206
	BIBLIOGRAFIA.....	207

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1: Definición de variables	24
Tabla 2: Especificaciones de tren de fuerza	43
Tabla 3: Subsistemas y componentes principales CAT 797F.....	46
Tabla 4: PRC de componentes tren de fuerza	49
Tabla 5: Frecuencia, tipo y cantidad de aceite	50
Tabla 6: Tabla de disponibilidades 2017	50
Tabla 7: Tabla de disponibilidades 2018	51
Tabla 8: Registro mensual MTBF 2017	52
Tabla 9: Registro mensual MTBF 2018	52
Tabla 10: PCR y parámetros beta.....	55
Tabla 11: Inventario de componentes mayores power train	55
Tabla 12: COSTO DE POSESION Y OPERACION	56
Tabla 13: Costo promedio de mantenimiento por equipo	57
Tabla 14: Análisis de Weibull Motor	60
Tabla 15: Análisis de Weibull Transmisión	62
Tabla 16 Análisis de Weibull Convertidor	64
Tabla 17: Análisis de Weibull Diferencial	66
Tabla 18: Análisis de Weibull Mando Final.....	68
Tabla 19: Horómetros para falla funcional.....	69
Tabla 20: Parámetros de confiabilidad de motor	70

Tabla 21: Parámetros de confiabilidad de transmisión	70
Tabla 22: Parámetros de confiabilidad de convertidor.....	71
Tabla 23: Parámetros de confiabilidad de diferencial	71
Tabla 24: Parámetros de confiabilidad de mando final	71
Tabla 25: Confiabilidad del sistema de tren de fuerza	72
Tabla 26: Cálculo de disponibilidad.....	72
Tabla 27: Costo total de reparaciones de la estrategia de mantenimiento correctivo.	73
Tabla 28: Intervalos de inspección por componente.....	83
Tabla 29: Eficiencia de equipo predictivo	84
Tabla 30: Costo de indisponibilidad estrategia condicional	84
Tabla 31: Costo neto de estrategia condicional	85
Tabla 32: Análisis ciclo de vida de motor	86
Tabla 33: Análisis ciclo de vida de transmisión	89
Tabla 34: Análisis ciclo de vida de convertidor.....	91
Tabla 35: Análisis ciclo de vida de diferencial	93
Tabla 36: Análisis ciclo de vida de mando final.....	95
Tabla 37: Horómetro de cambio óptimo según análisis de ciclo de vida	97
Tabla 38: Confiabilidad de motor por PRC óptimo	97
Tabla 39: Confiabilidad de transmisión por PRC óptimo	97
Tabla 40: Confiabilidad de convertidor por PRC óptimo	98
Tabla 41: Confiabilidad de diferencial por PRC óptimo	98
Tabla 42: Confiabilidad de mando final por PRC óptimo.....	98

Tabla 43: Confiabilidad del sistema de tren de fuerza por estrategia sistemática	99
Tabla 44: Costo total de estrategia sistemática de mantenimiento	99
Tabla 45: Cantidad de componentes por equipo para obtener una disponibilidad de 92.5%	100
Tabla 46: Costo de estrategia de alta disponibilidad	100
Tabla 47: Fallas funcionales del tren de fuerza	101
Tabla 48: Fallas funcionales del sistema del sistema de dirección y frenos	102
Tabla 49: Fallas funcionales del sistema de enfriamiento	102
Tabla 50: Fallas funcionales del sistema hidráulico	103
Tabla 51: Fallas funcionales del sistema eléctrico	104
Tabla 52: Fallas funcionales sistema estructural	105
Tabla 53: Fallas funcionales sistema de cabina	106
Tabla 54: Modos de falla de tren de fuerza (motor)	107
Tabla 55: Modos de falla sistema de dirección y frenos	109
Tabla 56: Modos de falla sistema de enfriamiento	111
Tabla 57: Modos de falla sistema hidráulico	112
Tabla 58: Modos de falla sistema eléctrico	117
Tabla 59: Modos de falla sistema estructural	133
Tabla 60: Modos de falla sistema de cabina	135
Tabla 61: Frecuencia de falla por sistema	136
Tabla 62: Criticidad de los modos de falla FMEA	138
Tabla 63: FMEA Modificado	152

Tabla 64: Criticidad de los modos de falla FMEA Modificado.....	155
Tabla 65: Modos de falla críticos según análisis 80-20	181
Tabla 66: Ratios de disponibilidad de flota principal (frentes fondos de mina).....	190
Tabla 67: Prueba de hipótesis RCM.....	201
Tabla 68: Resumen e estrategias	203



CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Tiempos de mantenimiento	35
Ilustración 2: Gráfica de parámetro de forma	40
Ilustración 3: Gráfica de parámetro de escala	40
Ilustración 4: Gráfica de parámetro de posición	41
Ilustración 5: Camión CAT 797F.....	48
Ilustración 6: Disponibilidad física 2017 - 2018.....	51
Ilustración 7: MTBF 2017 - 2018	53
Ilustración 8: Disponibilidad VS Utilización.....	54
Ilustración 9: Densidad de fallas Motor	61
Ilustración 10: Densidad de fallas transmisión	63
Ilustración 11: Densidad de fallas convertidor	65
Ilustración 12: Densidad de fallas diferencial.....	67
Ilustración 13: Densidad de fallas Mando Final	69
Ilustración 14: Análisis de ciclo de vida de motor.....	87
Ilustración 15: Análisis de ciclo de vida de transmisión	90
Ilustración 16: Análisis de ciclo de vida de convertidor	92
Ilustración 17: Análisis de ciclo de vida de diferencial.....	94
Ilustración 18: Análisis de ciclo de vida de mando final.....	96
Ilustración 19: Frecuencia de falla por sistema.....	137
Ilustración 20: FMEA Modificado	154
Ilustración 21: Prueba de normalidad de datos	191

Ilustración 22: Diagrama de árbol de modos de falla críticos198

Ilustración 23: Árbol lógico200



Resumen

El presente estudio fue diseñado con la finalidad de evaluar las estrategias de mantenimiento aplicables a una flota de camiones 797F en una operación minera al sur de Perú. Se realizó un análisis de costo de posesión y operación del camión minero CAT 797F que sirvió como base para el análisis de costos de indisponibilidad de cada estrategia. Dentro el estudio, el análisis se enfocó en demostrar cómo utilizar las herramientas de análisis de fallas, análisis de disponibilidad y análisis de confiabilidad para demostrar los resultados de utilizar una estrategia u otra a fin de aclarar la información para la toma de decisiones de la parte ejecutiva. La base de la información del presente estudio está en las especificaciones de fabricante, manuales de servicio, datos de reparación, datos de falla, datos de tiempos de falla y utilización del equipo. El análisis de Weibull se utilizó para evaluar los parámetros de confiabilidad de cada componente del tren de fuerza. Se consideró para cada estrategia el mantenimiento del tren fuerza como los componentes principales del equipo. Dentro del análisis de los modelos se proyectó los resultados a obtener utilizar estrategias de mantenimiento correctivo, condicional, sistemática, alta disponibilidad y aplicando ingeniería de confiabilidad. Para el modelo aplicando ingeniería de confiabilidad no solo se consideró las fallas de los componentes de tren de fuerza, sino que se utilizó la metodología de RCM II desarrollada por John Moubray para analizar las fallas del equipo y en base a un análisis de criticidad se definió los modos de falla funcional que tenían mayor impacto dentro de los resultados para luego plantear una estrategia para minimizar el impacto en el proceso. Finalmente se estimó que en el caso de camiones de gran minería la utilización de una estrategia basada en confiabilidad será de la que mejores resultados se obtenga.

Palabras clave: Mantenimiento, confiabilidad, equipo pesado minero, RCM, disponibilidad, Caterpillar 797F, Weibull, análisis de fallas.

Abstract

The present study was designed with the application of evaluation of maintenance strategies applied to a fleet of 797F trucks in a mining operation in southern Peru. An analysis of the cost of ownership and operation of the CAT 797F mining truck was performed, which served as the basis for the analysis of unavailability costs of each strategy. Within the study, the analysis focused on demonstrating how to use the tools of failure analysis, availability analysis and reliability analysis to demonstrate the results of using one strategy or another in order to clarify the information for the decision making of the part Executive The basis of the information in this study is in the manufacturer's specifications, service manuals, repair data, fault data, fault time data and equipment utilization. Weibull's analysis will be modified to evaluate the reliability parameters of each power train component. For each strategy, the maintenance of the power train is considered as the main components of the equipment. The results were projected within the model analysis to obtain correct, conditional, systematic maintenance, high availability and reliability engineering application strategies. For the model applying reliability engineering, not only the failures of the power train components were considered, but the RCM II methodology developed by John Moubray was analyzed to analyze the equipment failures and based on a critical analysis it was defined the functional failure modes that have the greatest impact on the results and then propose a strategy to minimize the impact on the process. Finally it was estimated that in the case of heavy mining trucks the use of a strategy based on reliability will be the best results.

Keywords: Maintenance, reliability, heavy mining equipment, RCM, availability, Caterpillar 797F, Weibull, failure analysis.

Introducción

Como gestores de mantenimiento buscamos optimizar los costos de mantenimiento, tener una alta disponibilidad y mantener una confiabilidad para lo cual el equipo ha sido diseñado. Para ello existen estrategias de mantenimiento que se plantean en base a análisis de datos, análisis estadístico, análisis de confiabilidad, modelos de costos y análisis de riesgos.

Un plan estratégico del equipo analiza todo el ciclo de vida del sistema donde maximizo la disponibilidad, maximizo mi productividad y minimizo mis costos globales. Para ello necesito estrategias de mantenimiento por lo que la gestión de activos se apoya en modelos de toma de decisiones.

En este caso los modelos de decisiones seleccionados son cuando seleccionar y reemplazar equipos, cuando aplicar overhaull, cuando seguir en reparaciones parciales.

Empezaremos analizando un modelo de Weibull, análisis de tendencia de Nelson Allen.

Cabe señalar que existen distintos modelos estadísticos para diferentes escenarios.

Weibull se utiliza para sistemas no reparables, por ejemplo, si un rodaje falla y lo cambias trabaja en un estado tan bueno como nuevo, en cambio para sistemas reparables tu reparas un componente o equipo no se encontrará en un estado tan bueno como nuevo, se encontrará en un estado tan bueno como antes fallar.

Por ejemplo, si un motor con 15000 horas falla por baja presión de refuerzo, por ejemplo, falla un turbo compresor y lo cambias, no aumenta la confiabilidad del equipo, solo se

mantiene tal cual como antes de fallar. Es por eso por lo que para estos dos tipos de sistemas se utilizan modelos distintos de análisis.

Se analizará la curva de la bañera (bathtub curve) y se comparará con el ciclo de vida del equipo, tanto financieramente como también por los overhaull en base al historial de falla del equipo. Analizaremos las estrategias con componentes nuevos y reparados.

La pregunta que nos hacemos es ¿Cuándo reparar o comprar un equipo nuevo? Y si reparo un equipo ¿hasta cuantas veces? El modelo para analizar será un camión minero de acarreo Caterpillar modelo 797F.

En el informe técnico se realizó el modelo de Jack Knife para evaluar la criticidad de un equipo. Se basa en 3 parámetros distintos que difiere de análisis de Pareto, primero se basa en la tasa de fallas y el tiempo medio para reparar (lo que se encuentre a la derecha será lo más crítico), luego la indisponibilidad (lo que se encuentre por encima de la línea de indisponibilidad será lo más crítico) y por último la mantenibilidad (lo que se encuentre por encima de la línea de mantenibilidad será lo más crítico), en conclusión lo más críticos se encontrarán en el segundo cuadrante.

Además, será necesario aplicar un test de tendencias para verificar si las fallas acumuladas siguen una distribución creciente (sistema triste) o decreciente (sistema feliz) o lineal con el tiempo.

Utilizaremos el test de tendencias de Laplace para identificar qué modelo de análisis aplicaremos, por ejemplo, Weibull (para sistemas no reparables) y Crow AMSSA, Log Lineal, Dillon (para sistemas reparables) de acuerdo con el valor de U .

CAPÍTULO I: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. Planteamiento teórico de la investigación

1.1 Identificación del problema

- a. Incertidumbre en la toma de decisiones:** La toma de decisiones en mantenimiento se debe basar en el análisis de las fallas, estrategia de mantenimiento y análisis de riesgos, además de cumplir el presupuesto estimado optimizando los costos.

“Existe incertidumbre en parte de los gestores de mantenimiento en definir sus principales parámetros para la toma de decisiones, esto involucra que no se identifica una secuencia de análisis correcta”

- b. Falla en la proyección de presupuesto de mantenimiento:** Generalmente no se realiza una buena estimación de costos al momento de plantear estrategias para la toma de decisiones, es por eso por lo que en la mayoría de los casos se establecen presupuestos poco acertados (real sobrepasa o están muy por debajo de lo proyectado).

“Las malas proyecciones de presupuesto le afectan a una operación minera de dos formas. Obviamente, subestimar los gastos de mantenimiento puede crear una emergencia financiera a mitad de camino o en un momento importante. La insuficiencia de recursos o el apoyo de mano de obra pueden echar abajo un

proyecto, lo que hace más costoso terminar debido a la demora. Todo este incremento inesperado de costos luego castiga el costo por tonelada lo que reduce las utilidades. Sobreestimar crea un exceso en el proyecto con demasiados recursos. Valiosos recursos se desperdician en el exceso de consumo, reduciendo de nuevo el dinero que podrían haber sido atribuidos a los beneficios.

- c. Desconocimiento de la estrategia actual y la utilización de nuevas estrategias de mejora de resultados en mantenimiento:** Carencia de análisis crítico a la situación actual y evaluación de nuevas propuestas en base a criterios técnicos y de gestión de mantenimiento.

“La carencia de un correcto análisis global de la gestión de mantenimiento no permite realizar ajustes en la estrategia al desconocer como impactaran el ajuste de variables en el resultado final de la gestión”.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar la mejor estrategia de mantenimiento una flota camiones de acarreo de mineral CAT 797F en base a análisis de fallas, confiabilidad, gestión de riesgos y análisis de costos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las técnicas para definición de criticidad de equipos en base a análisis de fallas y confiabilidad.

- Analizar la tendencia de fallas para el cálculo de proyección de fallas.
- Analizar las alternativas disponibles que respondan a una correcta elección en base a riesgo, confiabilidad y costos.

1.3 Alcances

Para el caso de estudio se analizará una flota de camiones mineros en una operación minera al sur del Perú donde se seguirá un proceso de análisis de criticidad, confiabilidad, riesgos y evaluación económica a fin de definir la mejor estrategia de mantenimiento. Se pretende que el presente estudio sirva como guía para futuros análisis de otras flotas en otras operaciones mineras.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedente I

Título: “Estudio de la factibilidad para la implementación de un área de planeamiento, programación y control de la producción para una empresa de alquiler de maquinaria pesada”.

Autor: Luis Carlos Cohaila Quiroz.

Lugar y fecha de publicación: Arequipa, 2008.

Objetivo: “Implementar un sistema de planificación y programación que les permita llevar un control adecuado del mantenimiento de equipos, buscando reducir los costos de mantenimiento correctivo y no programados. Así mismo llevar un control adecuado de los horómetros de los equipos y utilizar una precisión de servicio de +/- 25 horas. Considerar la infraestructura adecuada y la estrategia de implantación y control.

Además, considera la evaluación de la implementación y su factibilidad.”
(Cohaila, 2008)

1.4.2 Antecedente II

Título: “Diseño de un sistema de mejora continua en una embotelladora y comercializadora de bebidas gaseosas de la ciudad de Guayaquil por medio de la aplicación del TPM (Mantenimiento productivo total).”

Autor: Cesar Augusto Tuarez Medrando

Lugar y fecha de publicación: Guayaquil, 2013

Objetivo: La justificación de la implementación de TPM en las actividades de la compañía se basa en que este sistema de mejora continua tiene entre sus objetivos mejorar la confiabilidad de los equipos mediante el involucramiento de todos los colaboradores. (Medrando, 2013)

1.4.3 Antecedente III

Título: “Optimización de los procesos en el área de mantenimiento para mejorar la productividad de una planta productora de cemento portland.”

Autor: Luis Anthony Montoya Márquez

Lugar y fecha de publicación: Arequipa, 2015

Objetivo: Se busca optimizar los procesos en el área de mantenimiento para maximizar la productividad de la planta.

Se realiza un diagnóstico de la problemática y se plantea la implementación de un sistema de documentación. Se enfocarán en procesos de mejora continua

y se programa auditoria para evaluar los resultados de la implementación.
(Márquez, 2015)

1.4.4 Antecedente IV

Título: “Diseño de un modelo para aplicar el mantenimiento productivo total a los sectores de bienes y servicios”

Autor: Ignacio Martínez Sánchez

Lugar y fecha de publicación: México D.F. 2009

Objetivo: El modelo y filosofía de este proyecto es presentado en cuatro secciones: teoría, tipos de mantenimiento, diseño del modelo para poner en práctica el TPM⁹ y dos ejemplos de aplicación del modelo.

El modelo y metodología para diseñar e implementar sistemas de Mantenimiento Productivo Total (TPM), apoyando con diferentes técnicas: Benchmarking¹⁰, Control Total de Calidad, Mantenimiento Autónomo, Kan Van¹¹, Justo a Tiempo (JIT¹²), Cero Defectos, Kaizen (Mejoramiento continuo) entre otros, y de acuerdo con los principios de Junio Siros (conocimiento, entendimiento y comprensión del principio de operación de su equipo).

La filosofía propuesta es el compromiso y participación de la organización en la aplicación del modelo. (Sanchez, 2009)

1.5 Hipótesis

1.5.1 General


- “Es posible que la aplicación de herramientas de análisis de confiabilidad apoye a una mejor toma de decisiones con respecto a la gestión del mantenimiento de una flota de camiones de acarreo Caterpillar modelo 797F en una operación minera”

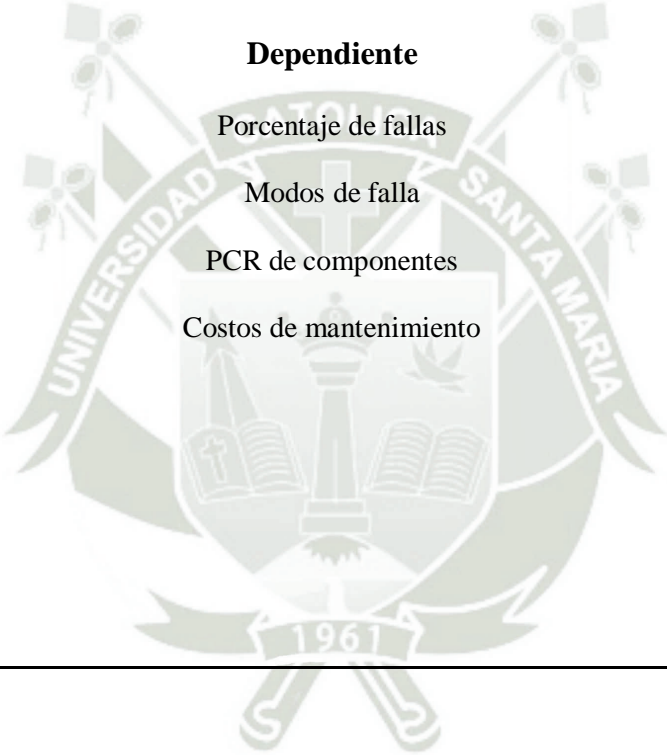
1.5.2 Nula

- “Es posible que la aplicación de herramientas de análisis de confiabilidad no apoye a una mejor toma de decisiones con respecto a la gestión del mantenimiento de una flota de camiones de acarreo Caterpillar modelo 797F en una operación minera”

1.6 Variables

Tabla 1: Definición de variables

Hipótesis	Variables	Indicadores
<p>“Es posible que la aplicación de herramientas de análisis de confiabilidad apoye a una mejor toma de decisiones con respecto a la gestión del mantenimiento de una flota de camiones de acarreo Caterpillar modelo 797F en una operación minera”</p>	 <p>Independiente</p> <p>Disponibilidad de flota</p> <p>Confiabilidad de flota</p>	<p>Porcentaje de disponibilidad</p> <p><i>DO: $MUT/(MUT+MTTR)$</i></p> <p>Porcentaje de cumplimiento de plan de mantenimiento</p> <p><i>C: $Trabajos\ realizados/Trabajos\ planificados$</i></p> <p>Cantidad de dinero ahorrado</p> <p><i>Porcentaje de ahorro</i></p> <p>Indicadores económicos y financieros</p> <p>VAN, TIR, B/C, ROA</p>

	 <p style="text-align: center;">Dependiente</p> <p style="text-align: center;">Porcentaje de fallas</p> <p style="text-align: center;">Modos de falla</p> <p style="text-align: center;">PCR de componentes</p> <p style="text-align: center;">Costos de mantenimiento</p>	<p style="text-align: center;">Porcentaje de falla <i>(Modo de falla / Total de fallas)</i></p> <p style="text-align: center;">Modos de falla <i>(Falla durante n periodo de tiempo)</i></p> <p style="text-align: center;">Horómetros <i>(Horómetro registrado en el equipo)</i></p> <p style="text-align: center;">PCR de componentes <i>(Duración de componente recomendada por cliente y fábrica)</i></p>
--	--	---

Fuente: Elaboración propia

1.7 Marco metodológico

El marco metodológico comprende los siguientes aspectos:

1.7.1 Definición del alcance

El nivel de investigación es explicativa longitudinal ya que se estudiará indicadores a lo largo de un periodo de tiempo y se realizará un diagnóstico que se enfocará en describir el impacto de esos indicadores en la toma de decisión para la reparación de un equipo minero.

1.7.2 Diseño de la investigación

La investigación será a nivel de campo y documental, ya que se obtendrá y analizará datos provenientes de fuentes primarias (observaciones directas de campo) y fuentes secundarias (información de planes de mantenimiento, ordenes de trabajo, backlogs, entre otra documentación y registros).

2. Planteamiento operacional

2.1 Técnicas

Dirigido al factor humano interviniente, procesos de mantenimiento y sistemas de gestión de mantenimiento.

- Información Primaria:

- Observación del proceso de mantenimiento.
- Ficha técnica de camión minero CAT 797F.

- Registro de cambio de componentes.
- Registro de fallas y tiempos de parada
- Registro de adquisición de equipos y reparaciones

- **Información Secundaria:**

- Indicadores de Disponibilidad y Utilización.
- Indicadores de Confiabilidad y Mantenibilidad

2.2 Instrumentos

- Registro de información de fallas.
- Manual de especificaciones de camión minero CAT 797F.
- Manual de operación y mantenimiento de camión minero CAT 797F.
- Mapas de proceso.
- Análisis Jackknife.
- Análisis de Weibull.
- Análisis de Crow-AMSAA.
- Test de tendencia de Laplace.
- Metodología RCM y otras técnicas comprobadas.
- Microsoft Office.

2.3 Campo de verificación

Se considera que el contexto operacional de camión minero CAT 797F es en una mina a tajo abierto a 3000 m.s.n.m. Se considera que los trabajos de cambio de

componentes se realizan en una bahía, la reparación de componentes en CRC y los trabajos en campo se desarrollan en toda la mina.

2.4 Estrategia

- Estudio de marco teórico.
- Análisis de factibilidad.
- Búsqueda de fuentes de información secundaria y establecimiento de fuentes de información primaria.
- Toma de datos y análisis de información.
- Aplicación de mejoras y análisis de resultados.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

1. Tipos de mantenimiento

1.1 Mantenimiento correctivo

Según García-Garrido “es el conjunto de tareas destinadas a corregir los defectos que se van presentando en los distintos equipos y que son comunicados al departamento de mantenimiento por los usuarios de estos” (García-Garrido, 2010). Se considera a este tipo la forma más básica de mantenimiento. Hasta la Primera Guerra Mundial era el único concepto de mantenimiento . El mantenimiento estaba asociado unicamente con la idea de reparar fallas.

1.2 Mantenimiento preventivo

La idea de adelantarse a las fallas fue concebida luego de la Primera Guerra Mundial, por lo que se buscaba garantizar el correcto funcionamiento de los equipos.

Para García-Garrido “es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las correcciones en de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno” (García-Garrido, 2010)

Rey Sacristán indica que “la creciente automatización de los procesos productivos y su complejo mantenimiento, hizo que a partir de los años 60 en Estados Unidos se introdujese el concepto de mantenimiento preventivo “. (Sacristán, 2002)

1.3 Mantenimiento predictivo

Para Félix Gómez “este tipo de mantenimiento surge como necesidad de reducir los costos de los métodos tradicionales de mantenimiento (correctivo y preventivo)” (León, 1998).

García-Garrido lo define como “el mantenimiento que persigue conocer e informar permanentemente del estado y operatividad de las instalaciones mediante el conocimiento de los valores de determinadas variables, representativas de tal estado y operatividad. Es el tipo de mantenimiento más tecnológico, pues requiere de medios técnicos avanzados y de fuertes conocimientos matemáticos, físicos y técnicos.” (García-Garrido, 2010). Félix Gómez indica que “ el mantenimiento predictivo se apoya en la existencia de parametros funcionales indicadores del estado del equipo y la vigilancia continua de los equipos” (León, 1998)

1.4 Mantenimiento cero horas (overhaul)

Según García-Garrido “es el conjunto de tareas cuyo objetivo es revisar los equipos a intervalos programados bien antes de que aparezca ningún fallo, bien cuando la fiabilidad del equipo ha disminuido apreciablemente de manera que resulta arriesgado hacer previsiones sobre su capacidad productiva. Dicha revisión consiste en dejar el equipo a Cero horas de funcionamiento, es decir, como si el equipo fuera nuevo. En estas revisiones se sustituyen o se reparan todos los elementos sometidos a desgaste. Se pretende asegurar, con gran probabilidad un tiempo de buen funcionamiento fijado de antemano.” (García-Garrido, 2010)

1.5 Mantenimiento en uso

Para García-Garrido “es el mantenimiento básico de un equipo realizado por los usuarios de este. Consiste en una serie de tareas elementales (tomas de datos, inspecciones visuales, limpieza, lubricación, reapriete de tornillos) para las que no es necesario una gran formación, sino tal solo un entrenamiento breve. Este tipo de mantenimiento es la base del TPM¹ (García-Garrido, 2010)

2. Modelos de mantenimiento

Los diferentes modelos de mantenimiento se aplican según la necesidad de uso o criticidad de equipos. Dentro de dichos modelos tenemos:

2.1 Modelo correctivo

Según Plaza Tovar, “se aplica cuando la avería ya ha surgido y es aplicable son en equipos cuyas averías no supongan ningún riesgo técnico para el resto del sistema” (Tovar, 2009)

Para García-Garrido “este modelo es el más básico, e incluye, además de las inspecciones visuales y la lubricación, la reparación de averías que surjan. Es aplicable, como veremos, a equipos con el más bajo nivel de criticidad, cuyas averías no suponen ningún problema, ni económico ni técnico. En este tipo de equipos no es rentable dedicar mayores recursos ni esfuerzos.” (Garrido, 2010)

2.2 Modelo condicional

¹ TPM son las siglas de Total Productive Maintenance o Mantenimiento Productivo Total.

Para García-Garrido “este modelo incluye la realización de una serie de pruebas o ensayos, que condicionarán una actuación posterior. Si tras las pruebas descubrimos una anomalía, programaremos una intervención; si, por el contrario, todo es correcto, no actuaremos sobre el equipo.” (García-Garrido, 2010)

Según Plaza Tovar “este modelo incluye el mantenimiento correctivo más la realización de una serie de pruebas y ensayos que condicionarán una actuación posterior” (Tovar, 2009)

Podemos concluir que este modelo es valedero en equipos de cuya probabilidad de fallo es baja aun siendo importantes en el sistema.

2.3 Modelo sistemático

Este tipo es usado en maquinaria de disponibilidad media, de cierta relevancia en el sistema.

De acuerdo con lo mencionado por García-Garrido “este modelo incluye un conjunto de tareas que realizaremos sin importarnos cuál es la condición del equipo; realizaremos, además, algunas mediciones y pruebas para decidir si realizamos otras tareas de mayor envergadura; y, por último, resolveremos las averías que surjan.” (García-Garrido, 2010)

Un ejemplo mencionado por García-Garrido es “un equipo sujeto a este modelo de mantenimiento es un reactor discontinuo², en el que las materias que deben

² Reactor discontinuo es un tipo de reactor químico que trabaja por cargas y con tiempos prolongados de reacción.

reaccionar se introducen de una sola vez, tiene lugar la reacción, y posteriormente se extrae el producto de la reacción, antes de realizar una nueva carga. Independientemente de que este reactor esté duplicado o no, cuando está en operación debe ser fiable, por lo que se justifica realizar una serie de tareas con independencia de que hayan presentado algún síntoma de fallo.” (García-Garrido, 2010)

2.4 Modelo de mantenimiento de alta disponibilidad

Modelo exigente utilizado en la maquinaria que no pueden padecer un mal funcionamiento o avería. Tiene exigencias de disponibilidad altas por encima del 88%.

Para Antonio Aguilera “la razón de un nivel tan alto de disponibilidad es en general el alto coste en producción que tiene una avería. Con una exigencia tan alta, no hay tiempo para el mantenimiento que requiera parada del equipo (correctivo, preventivo sistemático).” (Nieves, 2011)

Según García-Garrido “para mantener estos equipos es necesario emplear técnicas de mantenimiento predictivo, que nos permitan conocer el estado del equipo con él en marcha, y a paradas programadas, que supondrán una revisión general completa, con una frecuencia generalmente anual o superior. En esta revisión se sustituyen, en general, todas aquellas piezas sometidas a desgaste o con probabilidad de fallo a lo largo del año (piezas con una vida inferior a dos años). Estas revisiones se preparan con gran antelación, y no tiene porqué ser exactamente iguales año tras año.” (García-Garrido, 2010)

3. Confiabilidad

3.1 Definición

“Es la capacidad de un activo o componente para realizar una función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado.” (JIMENEZ, 2011)

3.2 Fórmula de cálculo

La confiabilidad operacional Co

$$Co = \frac{MTBF}{(MTBF+MTTR)}$$

Donde:

MTBF (Mean Time Between Failures): Es el Tiempo promedio entre Fallas

MTTR (Mean Time To Repair): Es el Tiempo Promedio para Reparar

MUT (Mean Up Time): es Tiempo Promedio en Operación (arriba) o Tiempo promedio para fallar (MTTF)

4. Disponibilidad

4.1 Definición

“Es la capacidad de un activo o componente para estar en un estado (arriba) para realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante dado de tiempo o durante un determinado intervalo de tiempo, asumiendo que los recursos externos necesarios se han proporcionado.” (JIMENEZ, 2011)

4.2 Fórmula de cálculo

La disponibilidad Operacional Do

$$D_o = \text{MUT} / (\text{MUT} + \text{MTTR})$$

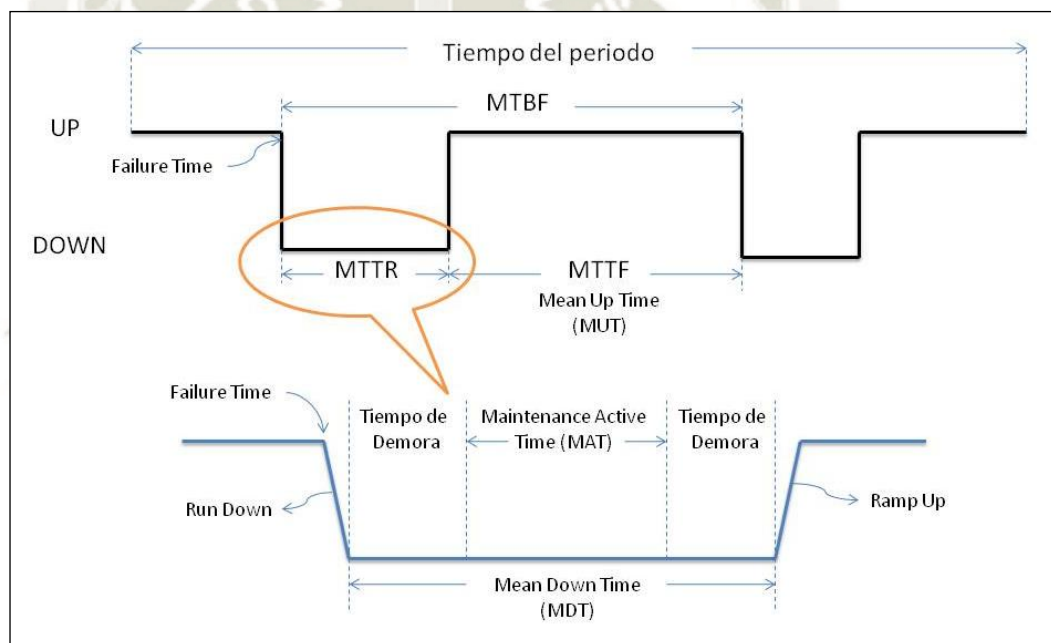
Donde:

MTBF (Mean Time Between Failures): Es el Tiempo promedio entre Fallas

MTTR (Mean Time To Repair): Es el Tiempo Promedio para Reparar

MUT (Mean Up Time): es Tiempo Promedio en Operación (arriba) o Tiempo promedio para fallar (MTTF)

Ilustración 1: Tiempos de mantenimiento



Fuente: Blog de mantenimiento LA (JIMENEZ, 2011)

5. Análisis de criticidad

5.1 Importancia del análisis de criticidad en la industria minera.

En la actualidad, para el caso de la minería peruana, el valor de los principales metales en un período de incertidumbre, se hace prácticamente una tarea obligatoria ser los más eficientes en cuando a la operatividad y mantenibilidad de

los equipos de minería, para asegurar obtener los mejores índices de productividad y de esa manera lograr aumentar la rentabilidad para las operaciones mineras.

En la actualidad, los recursos de mantenimiento se focalizan principalmente en fallas esporádicas y crónicas. Las primeras pueden ser las que afectan lo planificado (emergencias) o problemas que no ocurren tan seguidamente en un equipo. Por otro lado, las crónicas son las que aparecen de forma habitual, tanto que hasta suelen pasar desapercibidas. En éstas generalmente se trabaja en el efecto, pero no en la causa raíz que las origina, por lo que se hace inminente la posterior ocurrencia de la falla.

Tanto por la escasez de recursos destinados al mantenimiento y el contexto de como actualmente se dan las fallas en los equipos de minería en el Perú es necesario definir nuestra política de priorización para realizar planes efectos y que reflejen un mayor impacto inicial en los resultados, por lo cual se suelen seguir dos técnicas de priorización: Principio de Pareto y Diagrama Jack-nife.

5.2 Principio de Pareto

El Análisis de Pareto es una comparación cuantitativa y ordenada de elementos o factores según su contribución a un determinado efecto.

El objetivo de esta comparación es clasificar dichos elementos o factores en dos categorías: Los elementos muy importantes en su contribución y los elementos pocos importantes en ella. Es utilizado comúnmente para determinar ranking de fallas de equipos o componentes, respecto a su costo o bien tiempos de

indisponibilidad o inactividad (en las áreas del mantenimiento)
(ausencorylsones, 2019)

5.3 Diagrama Jack-Knife

Es un método para analizar el tiempo de inactividad o indisponibilidad de equipos o sistemas usando diagramas de dispersión. La elaboración de este diagrama preserva el esquema de clasificación de los histogramas de Pareto, y a su vez aporta contenidos adicionales con respecto a las frecuencias de fallas y tiempo medio de reparación, mediante la aplicación de valores límites, los diagramas de dispersión puede ser dividido en cuatro cuadrantes que permitan que las fallas sean clasificadas en: agudos, crónico, agudo/crónico y bajo control.

Además, permiten fácilmente la identificación de los problemas que afectan a la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema o equipos.
(ausencorylsones, 2019)

Respecto a la base metodológica del gráfico de dispersión, el eje X corresponderá al número de intervenciones del equipo (frecuencia de falla) y el eje Y corresponderá al tiempo medio de reparación (MTTR). Una recta dependiente negativa unitaria corresponde a todos los puntos con igual tiempo total no operativo, siendo este tiempo cada vez mayor a medida que la recta se aleja del origen. (ausencorylsones, 2019)

Esta metodología permite clasificar las intervenciones imprevistas en cuatro cuadrantes, mediante la determinación de valores límites para el MTTR y n , se considera aquellas fallas que tienen un tiempo medio de reparación muy largo, son del tipo Agudas, mientras que aquellas fallas que presentan un alto nivel de

ocurrencia son del tipo Crónicas, el cuadrante superior derecho representa una zona de fallas Agudas y Crónicas (Críticas), con ambos conceptos. (ausencorylsones, 2019)

5.4 Impacto del método dentro de una organización de mantenimiento

Los beneficios producidos en una organización de mantenimiento se enmarcan en tres grandes aspectos:

- Permite conocer la proporción de frecuencia y el tiempo medio para reparar que posee una determinada categoría de intervenciones, facilitando el diagnóstico, identificación y priorización de las causas que originan las fallas, mediante alguna técnica de análisis causa raíz (árbol de fallas, espina de pescado, 5 porqué, etc.).
- Identifica ciertas fallas de carácter crónico, que no necesariamente poseen un elevado tiempo fuera de servicio, pero que por su elevada frecuencia ocasionan costos indirectos debido a pérdidas operacionales y que afectan la confiabilidad del equipo. Por ejemplo, la reiterada falla del sistema de luces de un equipo implica su retiro de la operación y el traslado al taller de mantenimiento, ocasionando una importante pérdida de tiempo operativo y una disminución de su confiabilidad.
- Compara en un mismo gráfico el desempeño de los distintos componentes (elementos mantenibles), equipos, flotas, o periodos de tiempo. Esto resulta muy útil para establecer diferencias que ayudan a identificar oportunidades de mejora, o bien, para establecer tendencias entre distintos periodos de evaluación. (ausencorylsones, 2019)

6. Análisis de Weibull.

La distribución de Weibull es una distribución versátil que se puede utilizar para modelar una amplia gama de aplicaciones en ingeniería, investigación médica, control de calidad, finanzas y climatología. Por ejemplo, la distribución se utiliza frecuentemente con análisis de fiabilidad para modelar datos de tiempo antes de falla. La distribución de Weibull también se utiliza para modelar datos asimétricos del proceso en el análisis de capacidad. (MINITAB, 2019)

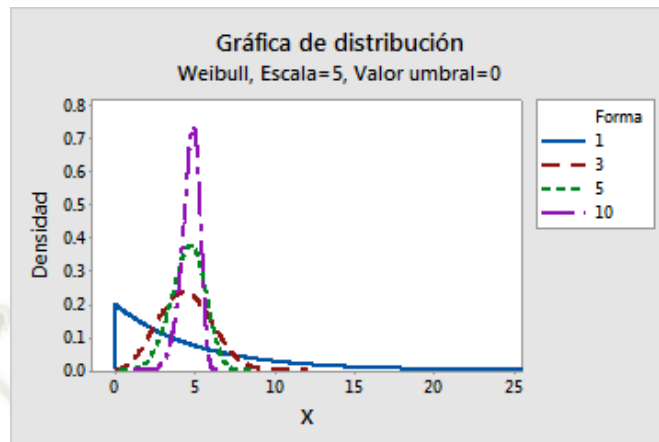
La distribución de Weibull se describe según los parámetros de forma, escala y valor umbral y también se conoce como la distribución de Weibull de 3 parámetros. El caso en el que el parámetro de valor umbral es cero se conoce como la distribución de Weibull de 2 parámetros. La distribución de Weibull de 2 parámetros se define solo para variables positivas. Una distribución de Weibull de 3 parámetros puede funcionar con ceros y datos negativos, pero todos los datos para una distribución de Weibull de 2 parámetros deben ser mayores que cero. (MINITAB, 2019)

Dependiendo de los valores de sus parámetros, la distribución de Weibull puede adoptar varias formas.

6.1 Efecto del parámetro de forma

El parámetro de forma describe la manera en que se distribuyen los datos. Una forma de 3 se aproxima a una curva normal. Un valor de forma bajo, por ejemplo 1, da una curva con asimetría hacia la derecha. Un valor de forma alto, por ejemplo 10, da una curva con asimetría hacia la izquierda. (MINITAB, 2019)

Ilustración 2: Gráfica de parámetro de forma

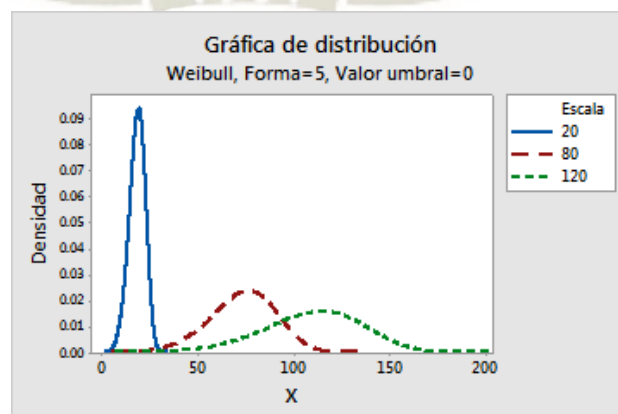


Fuente: Minitab.com

6.2 Efecto del parámetro de escala

La escala, o vida característica, es el percentil 63.2 de los datos. La escala define la posición de la curva de Weibull respecto del valor de umbral, lo cual es similar a la manera en que la media define la posición de una curva normal. Una escala de 20, por ejemplo, indica que el 63.2% de los equipos fallará en las primeras 20 horas después del tiempo umbral. (MINITAB, 2019)

Ilustración 3: Gráfica de parámetro de escala

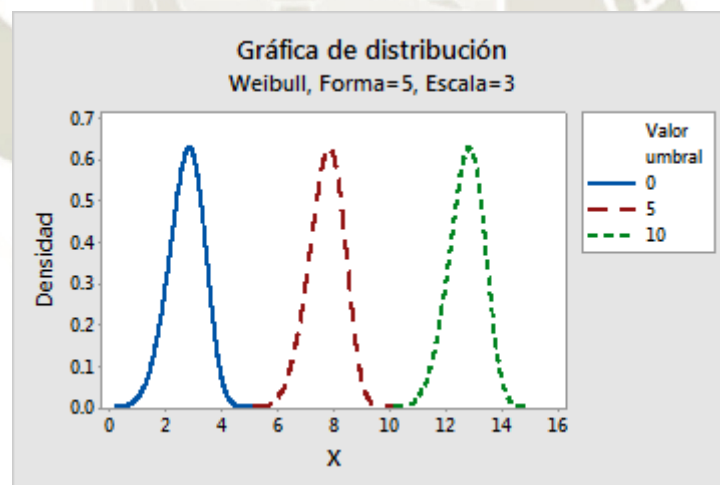


Fuente: Minitab.com

6.3 Efecto del parámetro de valor umbral

El parámetro de valor umbral describe un desplazamiento de la distribución alejándose del 0. Un valor umbral negativo desplaza la distribución hacia la izquierda, mientras que un valor umbral positivo desplaza la distribución hacia la derecha. Todos los datos deben ser mayores que el valor umbral. La distribución de Weibull de 2 parámetros es igual a la distribución de Weibull de 3 parámetros con un valor umbral de 0. Por ejemplo, la distribución de Weibull de 3 parámetros (3,100,50) tiene la misma forma y dispersión que la distribución de Weibull de 2 parámetros (3,100), pero está desplazada 50 unidades hacia la derecha. (MINITAB, 2019)

Ilustración 4: Gráfica de parámetro de posición



Fuente: Minitab.com

7. Análisis de Crow-AMSAA.

El Dr. Larry H. Crow señaló que el Modelo Duane podría representarse estocásticamente como un proceso de Weibull, permitiendo que se utilicen procedimientos estadísticos en la aplicación de este modelo en el crecimiento de la

confiabilidad. Esta extensión estadística se convirtió en lo que se conoce como el modelo Crow-AMSAA (NHPP). Este método se desarrolló por primera vez en la Actividad de Análisis de Sistemas de Material del Ejército de EE. UU. (AMSAA). Se usa frecuentemente en sistemas cuando el uso se mide en una escala continua. También se puede aplicar para el análisis de elementos de un disparo cuando hay una alta confiabilidad y un gran número de pruebas. (reliawiki.org, 2019)

Los programas de prueba generalmente se llevan a cabo fase por fase. El modelo Crow-AMSAA está diseñado para rastrear la confiabilidad dentro de una fase de prueba y no a través de fases de prueba. Un programa de prueba de desarrollo puede consistir en varias fases de prueba separadas. Si se introducen acciones correctivas durante una fase de prueba en particular, este tipo de prueba y los datos asociados son apropiados para el análisis del modelo Crow-AMSAA. El modelo analiza el progreso del crecimiento de la confiabilidad dentro de cada fase de prueba y puede ayudar a determinar lo siguiente:

- Fiabilidad de la configuración actualmente en prueba.
- Fiabilidad de la configuración en la prueba al final de la fase de prueba.
- Confiabilidad esperada si el tiempo de prueba para la fase se extiende
- Tasa de crecimiento
- Intervalos de confianza
- Pruebas de bondad de ajuste aplicables (reliawiki.org, 2019)

CAPITULO III: CAMION MINERO 797F

I. ESPECIFICACIONES

1. Generales

1.1 Tren de fuerza

Tabla 2: Especificaciones de tren de fuerza

Modelo de motor	Cat C175-20
Potencia bruta	2983 kW / 4000 hp
Potencia en el volante	2828 kW / 3793 hp
Calibre	175 mm / 6.89 pulgadas
Carrera	220 mm / 8.66 pulgadas
Cilindrada	105.8 litros
Cilindros	20
Sistema de inyección	Common Rail

Fuente: <https://www.cat.com/>

El motor Cat® C175 ACERT™ cumple con los requisitos EE.UU. EPA Tier 3/UE Etapa IIIa, con sistema de combustible Common Rail, ADEM™IV, frenos en los ejes y convertidor de par con embrague de traba, proporciona cambios de marcha suaves y uniformes con control de la fuerza de tracción y la eficiencia de mando directo.

1.2 Peso y diseño estructural

Peso en orden de trabajo	687,500 kg
---------------------------------	------------

Fuente: <https://www.cat.com/>

El Caterpillar 797F es el último modelo de la serie 797 fabricados y desarrollados por los ingenieros de Caterpillar, posicionándose en la actualidad como el segundo dumper más grande del mundo, presente en el mercado desde el año 2009. Este enorme vehículo puede transportar 400 toneladas de carga útil, un incremento sustancial en comparación con sus modelos anteriores 797 y 797B, los cuales disponían de una capacidad de 360 y 380 toneladas respectivamente.

El camión dumper tiene un peso bruto operativo de 687,5 t, con unas dimensiones que alcanzan los 14,8 m de longitud, 6,52 m de altura y 9,75 m de ancho. Asimismo, está equipado con seis neumáticos radiales Michelin XDR o Bridgestone VRDP, además de contar con motor diésel C175-20 con turbocompresor de cuatro tiempos y una transmisión de convertidor de par hidráulico, permitiendo operar a una velocidad máxima de 68 km/h.

1.3 Transmisión

La servotransmisión planetaria de siete velocidades de Cat se acopla con el motor C175-20 para suministrar potencia constante en una amplia gama de velocidades de operación. Cuenta con un diseño robusto diseñada para la más alta potencia del motor C175-20, la servotransmisión planetaria comprobada se fabrica para que sea resistente.

- Larga vida útil: circuito y tanque de aceite exclusivo que proporciona aceite más frío y limpio para alcanzar el máximo rendimiento y vida útil más larga de los componentes.

Control electrónico de la presión del embrague

El ECPC proporciona máximo rendimiento, cambios más suaves, larga vida útil de los embragues y un andar más confortable.

1.4 Convertidor de par

Combina la fuerza máxima de tracción y la suavidad en los cambios de marcha del mando del convertidor de par, con la eficiencia y el rendimiento del mando directo. El convertidor de par con sistema de traba se conecta a aproximadamente 8 km/h (5 mph) para proporcionar más potencia a las ruedas. (CAT.COM, 2019)

1.5 Diferencial

Se llama diferencial al conjunto de engranajes acoplados de tal forma que compensan la diferencia de velocidad de giro de las ruedas. Mediante el diferencial se consigue que cada rueda pueda girar correctamente en una curva, sin perder por ello la fijación de ambas sobre el eje, de manera que la tracción del motor actúa con la misma fuerza sobre cada una de las dos ruedas.

1.6 Mandos finales

Los mandos finales son dos conjuntos de reductores planetarios de velocidad. cada conjunto consta de un engranaje sol (central) y cuatro planetarios, en cada conjunto el torque se multiplica 4 veces.

Tabla 3: Subsistemas y componentes principales CAT 797F

Equipo / Modelo	Camión minero CAT 797F						
Subsistemas	Tren de fuerza	Sistema de dirección y frenos	Sistema de enfriamiento	Sistema Hidráulico	Sistema Eléctrico	Sistema estructural	Sistema de Cabina
Funciones primarias	Ofrecer una potencia bruta al equipo de 4000 Hp para poder trasladarse a una velocidad máxima de 68 km/h en terreno	Ofrecer capacidad de frenado y control de dirección del equipo en movimiento	Mantener una temperatura adecuado de acuerdo con cada componente según especificaciones técnicas de fabricante	Facilitar la manipulación de componentes principales en el levante y acarreo de material mediante	Proveer la alimentación al equipo para controlar componentes electrónicos, iluminación y el arranque del equipo.	Soportar y proteger todos los componentes del equipo durante su operación y mantenimiento de forma segura.	Proporcionar al operador un ambiente seguro de operación durante 12 horas continuas.

	accidentado, con una carga de 400 Ton			aceite hidráulico			
Componentes	Motor Cat C175 ACERT	Paquete de embragues de dirección	Radiador modular	Bomba hidráulica	Motor de arranque eléctrico	Bastidor delantero	Aire acondicionado y calentador con control automático de temperatura
	Transmisión	Paquetes de freno	Control de Refrigerante de motor	Componente hidráulico de Dirección	Sistema de luces halógenas (delanteras y traseras)	Bastidor trasero	Asiento (tela) con suspensión neumática Confort Cat
	Convertidor	Sistema hidráulico	Válvulas y cañerías	Control de hoja	Alternador	Implementos	Calentador y des congelador

	Diferencial	Solenoides	Ventiladores	Componente hidráulico de implementos	ECM	Montaje de motor	Cabina insonorizada y presurizada con Estructura de Protección en Caso de Vuelcos
	Mandos finales	Resortes tipo Belleville	Disipadores	Componente hidráulico de Frenos	Componente de bloqueo / desenergización	Montaje de transmisión	Filtros de aire de cabina

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 5: Camión CAT 797F



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

1. Estrategia actual

Actualmente se cuenta con **28** camiones 797F en operación, se realiza un mantenimiento programado de 8 pasos cada 250 horas, además se realiza un procedimiento de cambio de componentes según PCR fijado por fábrica el cual se detalla en la tabla 3.

En cuanto a seguimiento de componentes mayores, se realiza monitoreo de condiciones (tribología). No se realiza análisis termográfico o monitoreo estructural (ultrasonido). Generalmente el análisis de aceite es realizado por una condición extrema del equipo y no se tiene fijado un intervalo correcto de muestreo (se desconoce la utilización del intervalo P-F para el cálculo de intervalos de muestreo).

Tabla 4: PRC de componentes tren de fuerza

Componente	PCR (horas)
Motor	11000
Transmisión	10000
Convertidor	10000
Diferencial	12000
Mandos Finales	12000

Fuente: Manual de servicio CAT

El intervalo de PM está definido por el intervalo de cambio de aceite de motor.

Actualmente la frecuencia de cambio de aceites y el tipo de aceite utilizado es como se muestra en la tabla 4:

Tabla 5: Frecuencia, tipo y cantidad de aceite

Componente	Intervalo de cambio (horas)	Tipo	Cantidad (GL)
Motor	333	SAE 15W-40	110
TX-TC	1000	SAE 30	166
Rueda	1000	SAE 60	32
Hidráulico	2000/4000	10W	489
Dirección	4000	SAE 30	95
Diferencial	4000	FDAO 60	410

Fuente: Manual de servicio CAT

2. Evaluación de indicadores de mantenimiento

2.1 Disponibilidad

La disponibilidad física promedio en entre 2017 y 2018 fue de 88.92%, lo que indica que existe una posibilidad de mejora, dado un target a nivel mundial es de 92.5%.

Tabla 6: Tabla de disponibilidades 2017

Periodo	Disponibilidad
Ene-17	87.03%
Feb-17	88.62%
Mar-17	87.09%
Abr-17	89.11%
May-17	85.95%
Jun-17	88.76%
Jul-17	90.44%
Ago-17	89.45%
Set-17	87.99%
Oct-17	86.37%
Nov-17	89.94%
Dic-17	85.79%

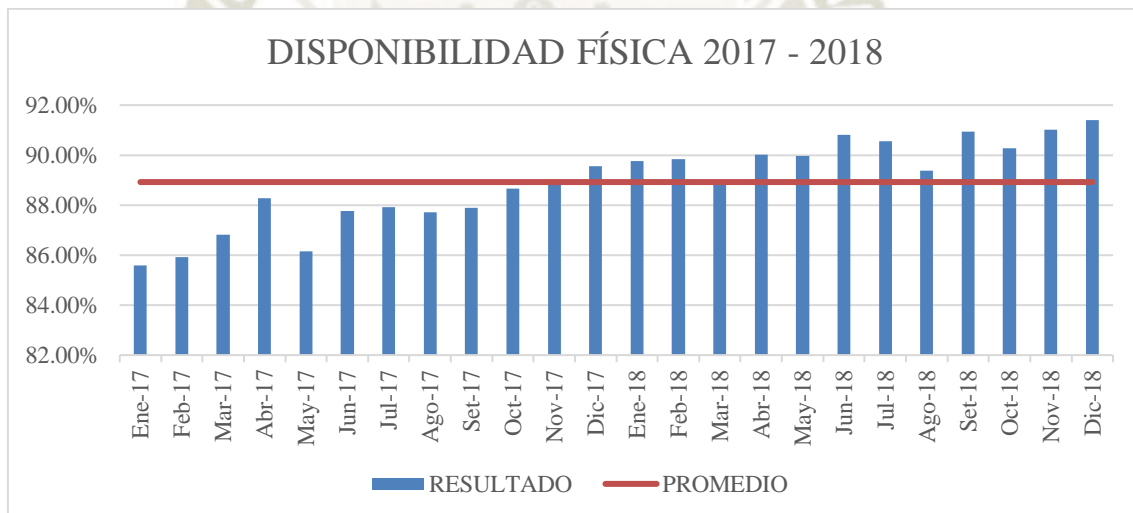
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Tabla de disponibilidades 2018

Periodo	Disponibilidad
Ene-18	87.85%
Feb-18	89.49%
Mar-18	87.03%
Abr-18	86.64%
May-18	89.86%
Jun-18	89.62%
Jul-18	85.79%
Ago-18	89.91%
Set-18	88.98%
Oct-18	85.94%
Nov-18	88.64%
Dic-18	88.07%

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 6: Disponibilidad física 2017 - 2018



Fuente: Elaboración propia

2.2 MTTR

El tiempo medio para reparar (MTTR) es en promedio de los años 2017 y 2018 de **3.47** horas, siendo un promedio aceptable dentro del rango de Caterpillar, sin embargo, es correcto analizar el porcentaje de horas de trabajo planificado sobre lo imprevisto es de 56% / 44%, lo que indica que existe una oportunidad de mejora y se recomienda evaluar el MTBF.

2.3 MTBF

El tiempo medio entre fallas (MTBF) es en promedio de los años 2017 y 2018 es de 37.38 horas, lo que está por debajo del indicador de clase mundial de Caterpillar que es de 70 horas.

Tabla 8: Registro mensual MTBF 2017

Periodo	MTBF (horas)
Ene-17	46.18
Feb-17	37.09
Mar-17	25.58
Abr-17	43.29
May-17	43.18
Jun-17	44.05
Jul-17	46.97
Ago-17	33.06
Set-17	41.19
Oct-17	30.93
Nov-17	34.02
Dic-17	23.12

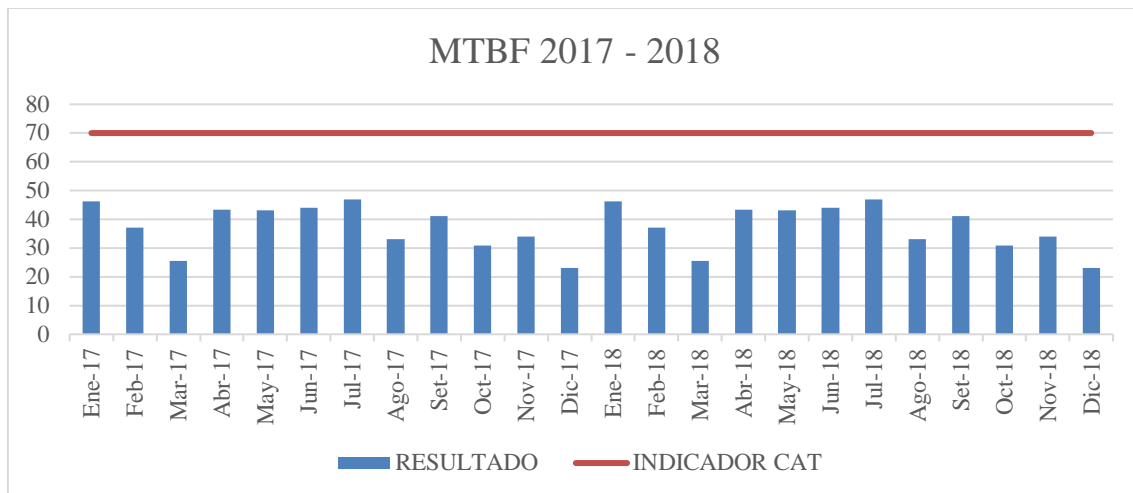
Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Registro mensual MTBF 2018

Periodo	MTBF (horas)
Ene-18	46.18
Feb-18	37.09
Mar-18	25.58
Abr-18	43.29
May-18	43.18
Jun-18	44.05
Jul-18	46.97
Ago-18	33.06
Set-18	41.19
Oct-18	30.93
Nov-18	34.02
Dic-18	23.12

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7: MTBF 2017 - 2018



Fuente: Elaboración propia

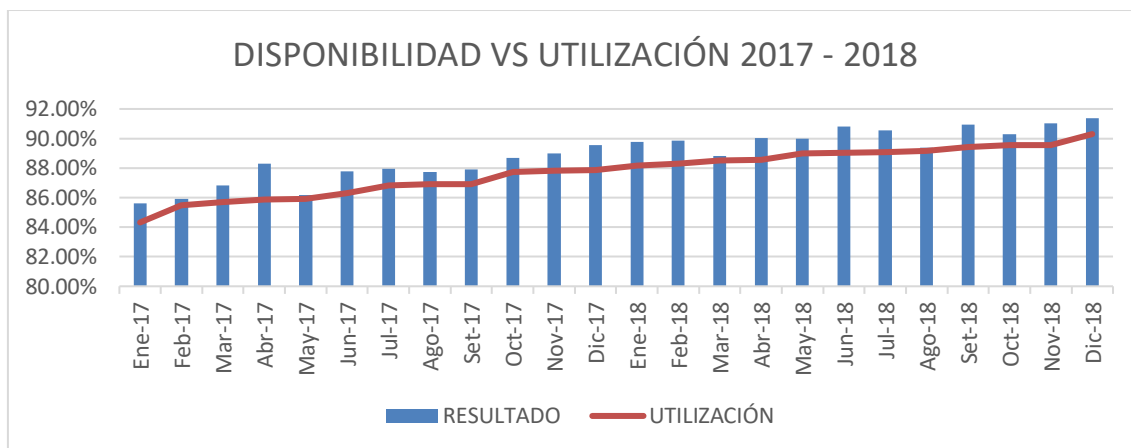
2.4 MTFS APM

Este indicador es conocido como el tiempo medio de parada después del mantenimiento programado y fue en promedio durante 2017 y 2018 de **28.42 horas**, lo cual denota que no se están realizando un mantenimiento correcto dentro del taller, por lo cual lo equipos paran prematuramente luego de su mantenimiento programado (considerando únicamente fallas, no se incluye eventos operacionales).

3. Utilización

De acuerdo con los datos de la tabla 9, el porcentaje de utilización en promedio de los últimos 2 años ha sido del **87.87%** con un crecimiento constante proyectado para **90.1%** en los próximos 3 años, esto se debe principalmente a que la operación minera está dando de baja a unidades más antiguas como los modelos 793C y D.

Ilustración 8: Disponibilidad VS Utilización



Fuente: Elaboración propia

4. TAT y Lead times.

El tiempo de atención en talleres (TAT) actual para componentes de tren de fuerza de camión minero 797F es de 72 días, además el Lead time promedio para la atención de componentes nuevos es de 95 días. El TAT está definido estrictamente a la logística de envío y recojo, al pedido de repuestos y al proceso de reparación en talleres.

El TAT será proporcional al cumplimiento del plan de cambio y envío de componentes a reparación, por lo que el TAT de reparación de un componente por falla será mayor a uno por reparación programada.

5. Estado de componentes

5.1 Parámetros beta de los componentes.

La siguiente tabla muestra el tiempo de vida de los componentes indicado por fábrica y el parámetro Beta definido por Caterpillar para cada componente nuevo.

El parámetro Beta es uno de los 3 parámetros del análisis de Weibull, conocido como el parámetro de forma.

Tabla 10: PCR y parámetros beta

Componente	PCR (horas)	Valor Beta Fábrica
Motor	11000	3.5
Transmisión	10000	4
Convertidor	10000	4
Diferencial	12000	3.5
Mandos Finales	12000	3.5

Fuente: Manual de servicio Caterpillar

5.2 Inventario actual de los componentes de tren de fuerza.

Tabla 11: Inventario de componentes mayores power train

Componente	Inventario (unidades)
Motor	5
Transmisión	4
Convertidor	6
Diferencial	5
Mandos Finales	8

Fuente: Elaboración propia

6. Costos de posesión y operación por equipo.

De acuerdo con los parámetros de costos detallado en la Tabla 11, el costo total de posesión y operación de 1 camión 797F es de **704.81 USD/hora**

Tabla 12: COSTO DE POSESION Y OPERACION

A	TIPO DE EQUIPO	797F	
B	TIEMPO ESTIMADO DE UTILIZACION	8	años
C	HORAS TOTAL DE UTILIZACION (ANUAL)	7000	hrs
D	TIEMPO DE POSESION	56000	hrs
1.A	PRECIO DE ENTREGA	5000000	USD
1.B	COSTO DE NEUMATICOS	162000	USD
1.C	PRECIO SIN NEUMATICO	4838000	USD
2	DEPRECIACION	60%	
3	VALOR DE RESCATE	2000000	USD
3.A	VALOR NETO A RECOBRAR MEDIANTE TRABAJO	2838000	USD
3.B	VALOR NETO A RECOBRAR MEDIANTE TRABAJO	50.68	USD/hora
4	FINANCIAMIENTO	3596375	USD
4.A	MONTO UNITARIO DE FINANCIAMIENTO	513.77	USD/hora
5	TASA DE INTERES FINANCIAMIENTO	87.34	
	TASA DE INTERES SEGURO	5.14	
6	IMPUESTO	61.65	
7	COSTO TOTAL POSESION	204.81	USD/hora
8	FACTOR DE CARGA (PAG 1268) TABLA HANDBOOK	97.70	GLN
	COSTO UNITARIO DE COMBUSTIBLE	4	USD
	COSTO HORARIO DE COMBUSTIBLE	390.8	USD/hora
9	PM (HRS AÑO ENTRE LA F DE MTTO)	12	USD/hora
10	NEUMATICOS (PAG 1282) ESTIMACION DURACION	32.4	USD/hora
11	REPARACIONES MC	23	USD/hora
	COSTO DE LOS ELEMENTOS	7.8	USD/hora
13	COSTOS TOTALES DE OPERACIÓN	466	USD/hora
14	COSTO POSESION Y OPERACIÓN	670.81	
15	OPERADOR	34	USD/hora
	COSTO TOTAL PYO + OPERADOR	704.81	USD/hora

Fuente: Elaboración propia

7. Costo de mantenimiento por equipo.

Tabla 13: Costo promedio de mantenimiento por equipo

CLASE DE COSTO	DESC CLASE COSTO	COSTO PROMEDIO ANUAL POR CAMIÓN
72302201	ACEITES Y GRASAS	\$ 5,864.92
72302268	PLACAS DE ACERO A 36	\$ 16.97
72403302	MAT CONSUMIBLES MISCELANEOS	\$ 20.16
72403306	MATERIALES DE SEGURIDAD	\$ 15.53
72403312	EMPAQ PEGAMENTO Y PROD DE HULE	\$ 16.62
72403313	CADENAS CABLES Y FERRETERIAS	\$ 2.34
72403314	GASES INDUST EXPLOSIVOS YARTIFICIOS	\$ 270.30
72403316	PROD QUIMICOS ACC PARA LABORATORIO	\$ 886.68
72403319	HERRAMIENTAS DE MANO	\$ 3.72
72403322	MAT DE ARQ ING CONST Y FERROVIARIA	\$ 10.21
72403324	PLACAS Y PERFILES ESTRUCT	\$ 2,017.32
72403326	SOLDADURAS FUNDENTES Y ACCES	\$ 288.25
72403328	TUBERIAS Y VALVULAS EN GRAL	\$ 41.53
72403332	CHUMACERAS RETENES Y RODAMIENTOS	\$ 35.24
72403334	FILTROS EN GENERAL	\$ 2,105.73
72403336	MATERIAL ELECTRICO	\$ 99.67
72403337	MATERIAL DE INSTRUMENTACION	\$ 120.83
72403342	REFACCIONES EQUIPO LIGERO	\$ 0.48
72403348	REFACCIONES PARA MAQ PESADA	\$ 30,634.39
72403354	BOMBAS Y REFACCACCIONES EN GRAL	\$ 19.38
72403363	REF EQUIPO DE PROCESO	\$ 0.25
72403398	REP EQUIPO FUERA UNIDAD	\$ 46,309.35
72403399	COMPRAS DIRECTAS	\$ 5,892.48
72504416	SERVICIOS CONTRATISTAS REPARACION	\$ 2,918.05
72504422	SERV CONTRATISTAS OTROS	\$ 760.05
72504428	SERV CONTRATISTAS REPARACION CAM 797	\$ 20,409.22
72302257	LLANTAS REENCAUCHADAS	\$ 369.52
TOTAL		\$ 119,129.20

Fuente: Elaboración propia

8. Diagnostico.

De los datos señalados anteriormente se observa el valor promedio de disponibilidad de 88.92% no llega a lo esperado por Caterpillar, además el valor de MTBF **37.38 horas** es muy bajo y la referencia de trabajo programado VS no programado **56% / 44%** da indicios que no se están realizando PM's con la calidad suficiente y se está realizando muchas tareas correctivas en campo, lo cual se reconfirma con el indicador MTFS APM ³de **28,42 horas**.

Se revisa que el nivel de utilización ha venido en aumento, lo que se proyecta a un nivel de **90.1%** en los próximos 3 años, esto se debe principalmente a que la operación minera está dando de baja a unidades más antiguas como los modelos 793C y 793D.

³ MTFS APM: Es un indicador conocido como el tiempo promedio de paradas después del mantenimiento programado.

CAPITULO V: EVALUACION DE ESTRATEGIAS APLICABLES

1. Estrategia correctiva

1.1 Contexto

En un contexto de estrategia de mantenimiento correctiva para componente mayores será necesario considerar la confiabilidad de cada componente del tren de fuerza, para poder definir cuál será el porcentaje de falla en bloques y cómo afectará a la disponibilidad y confiabilidad del equipo. Suponiendo además que llevaremos los componentes constantemente a la falla, el nivel de TAT será mayor, por lo que será necesario contar con un mayor nivel de componentes en inventario, eso incrementará el presupuesto. En tal caso empezaremos a analizar los indicadores de confiabilidad de cada componente, luego realizaremos la proyección con la principal falla funcional crítica (falla que ocasione que el componente no se pueda utilizar nuevamente y requiera ser enviado a taller a reparación general).

1.2 Análisis por componente

1.2.1 Motor

Se analiza las principales fallas del año 2018, además se toma como referencia el manual de operación y mantenimiento. Se define como la principal falla funcional a la falla del sistema de lubricación de motor. Se utiliza un análisis de 10 eventos de falla de baja de presión de lubricación, se tiene los siguientes resultados de acuerdo con el análisis de Weibull de 2 parámetros,

el parámetro de densidad de falla determinará el valor al cual definiremos que se dio la falla funcional:

Tabla 14: Análisis de Weibull Motor

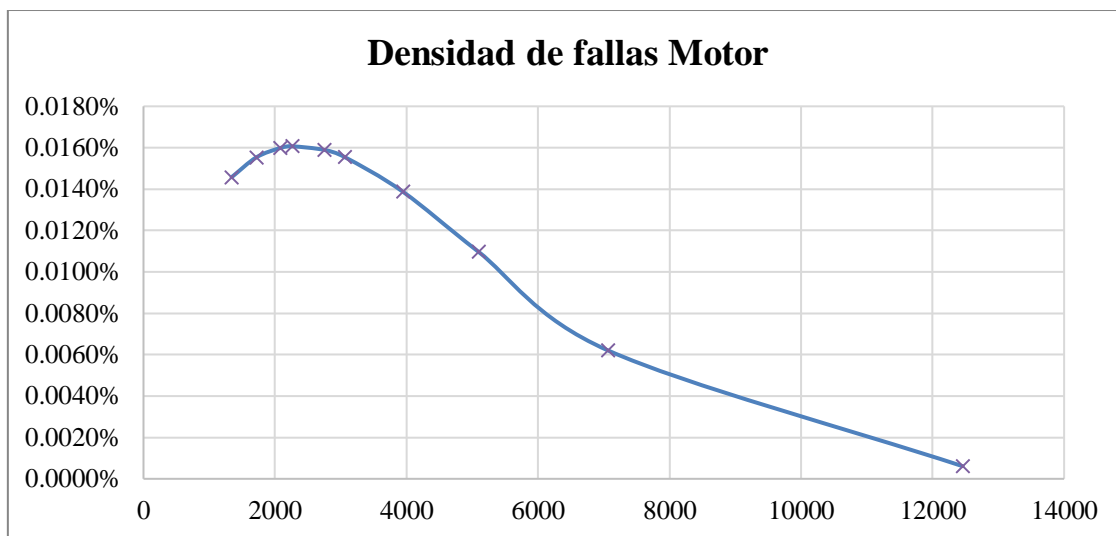
Orden	Tiempo entre fallas	Línea media % Acumulado de falla	Función de densidad de probabilidad PDF f(t)	Función de distribución acumulada CDF F(t)	Confiabilidad R(t)	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(t))))	Tasa de falla h(t)	Tasa acumulativa de falla H(t)
1	1340	6.7%	0.0146%	13.72%	86.3%	7.20	-2.66	0.00016889	0.147566979
2	1717	16.3%	0.0155%	19.41%	80.6%	7.45	-1.72	0.000192778	0.215828027
3	2082	26.0%	0.0160%	25.18%	74.8%	7.64	-1.20	0.000213662	0.290060352
4	2263	35.6%	0.0161%	28.08%	71.9%	7.72	-0.82	0.000223381	0.329618454
5	2751	45.2%	0.0159%	35.90%	64.1%	7.92	-0.51	0.000247914	0.444705293
6	3065	54.8%	0.0155%	40.84%	59.2%	8.03	-0.23	0.000262633	0.524880638
7	3945	64.4%	0.0139%	53.84%	46.2%	8.28	0.03	0.0003005	0.772985522
8	5093	74.0%	0.0110%	68.13%	31.9%	8.54	0.30	0.00034438	1.143645518
9	7062	83.7%	0.0062%	84.86%	15.1%	8.86	0.59	0.000410004	1.887973513
10	12456	93.3%	0.0006%	98.90%	1.1%	9.43	0.99	0.00055501	4.507746588

Fuente: Elaboración propia

β	1.53
η	4666.22
γ	0.000
R	0.939
R2	0.914
R ideal	1.000
Delta R	0.061

El valor de Beta β es de 1.53 lo que indica que se tiene un comportamiento normal de falla por envejecimiento, el valor de Eta de 4666.22 indica que el 63.2% de los motores presentará esta falla en las primeras 4666.22 horas después del tiempo umbral.

Ilustración 9: Densidad de fallas Motor



Fuente: Elaboración propia

El análisis de densidad de falla PDF $f(t)$ indica que la mayor densidad de fallas se encuentra alrededor de las 2263 horas, por lo cual se establecerá este horómetro para el análisis final de la evaluación de la estrategia de mantenimiento correctivo.

1.2.2 Transmisión

Se analiza las principales fallas del año 2018, además se toma como referencia el manual de operación y mantenimiento. Se define como la principal falla funcional a la falla de las válvulas de control de la transmisión.

Se utiliza un análisis de 10 eventos de falla, se tiene los siguientes resultados de acuerdo con el análisis de Weibull de 2 parámetros, el parámetro de densidad de falla determinará el valor al cual definiremos que se dio la falla funcional:

Tabla 15: Análisis de Weibull Transmisión

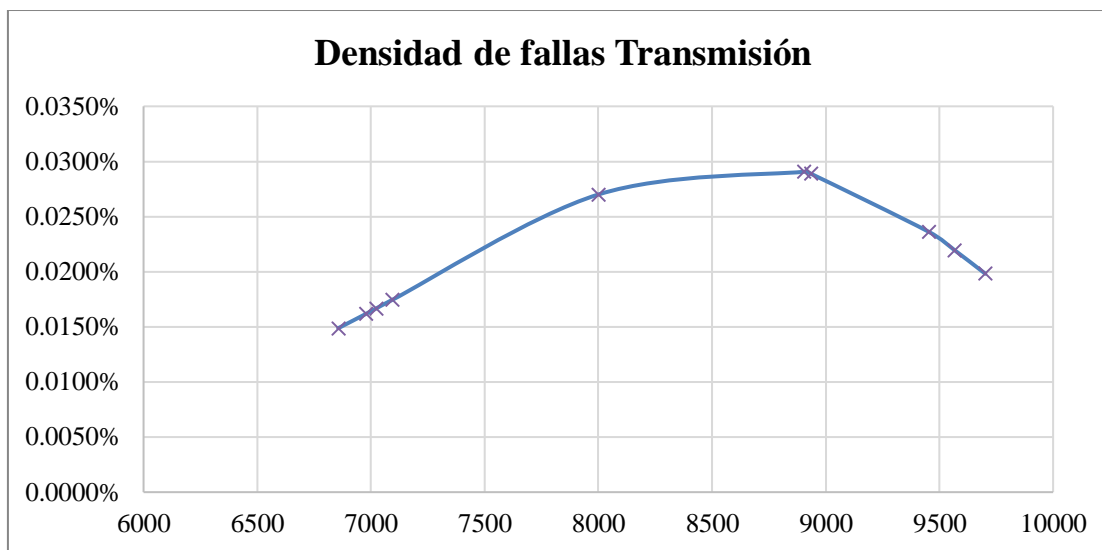
Orden	Tiempo entre fallas	Línea media % Acumulado de falla	Función de densidad de probabilidad PDF f(t)	Función de distribución acumulada CDF F(t)	Confiabilidad R(t)	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(t))))	Tasa de falla h(t)	Tasa acumulativa de falla H(t)
1	6856	6.7%	0.0149%	15.76%	84.2%	8.83	-2.66	0.000176495	0.171483189
2	6977	16.3%	0.0162%	17.64%	82.4%	8.85	-1.72	0.000196223	0.194015022
3	7022	26.0%	0.0167%	18.37%	81.6%	8.86	-1.20	0.000204014	0.203019383
4	7094	35.6%	0.0174%	19.60%	80.4%	8.87	-0.82	0.000217016	0.218172406
5	8001	45.2%	0.0270%	39.95%	60.1%	8.99	-0.51	0.000449734	0.509938382
6	8903	54.8%	0.0291%	66.16%	33.8%	9.09	-0.23	0.000858863	1.083623037
7	8934	64.4%	0.0289%	67.06%	32.9%	9.10	0.03	0.000877135	1.11053019
8	9452	74.0%	0.0236%	80.85%	19.1%	9.15	0.30	0.001233995	1.65293165
9	9567	83.7%	0.0219%	83.47%	16.5%	9.17	0.59	0.001327767	1.800178036
10	9702	93.3%	0.0198%	86.29%	13.7%	9.18	0.99	0.001445367	1.987270849

Fuente: Elaboración propia

β	7.06
η	8802.25
γ	0.000
R	0.920
R2	0.897
R ideal	1.000
Delta R	0.080

El valor de Beta β es de 7.06 es un buen indicar lo que indica que se tiene un comportamiento normal de falla por envejecimiento, el valor de Eta de 8802.25 indica que el 63.2% de las transmisiones presentará esta falla en las primeras 8802.25 horas después del tiempo umbral.

Ilustración 10: Densidad de fallas transmisión



Fuente: Elaboración propia

El análisis de densidad de falla PDF $f(t)$ indica que la mayor densidad de fallas se encuentra alrededor de las 8903 horas, por lo cual se establecerá este horómetro para el análisis final de la evaluación de la estrategia de mantenimiento correctivo.

1.2.3 Convertidor

Se analiza las principales fallas del año 2018, además se toma como referencia el manual de operación y mantenimiento. Se define como la principal falla funcional a la falla de la bomba de carga de convertidor.

Se utiliza un análisis de 10 eventos de falla, se tiene los siguientes resultados de acuerdo con el análisis de Weibull de 2 parámetros, el parámetro de densidad de falla determinará el valor al cual definiremos que se dio la falla funcional:

Tabla 16 Análisis de Weibull Convertidor

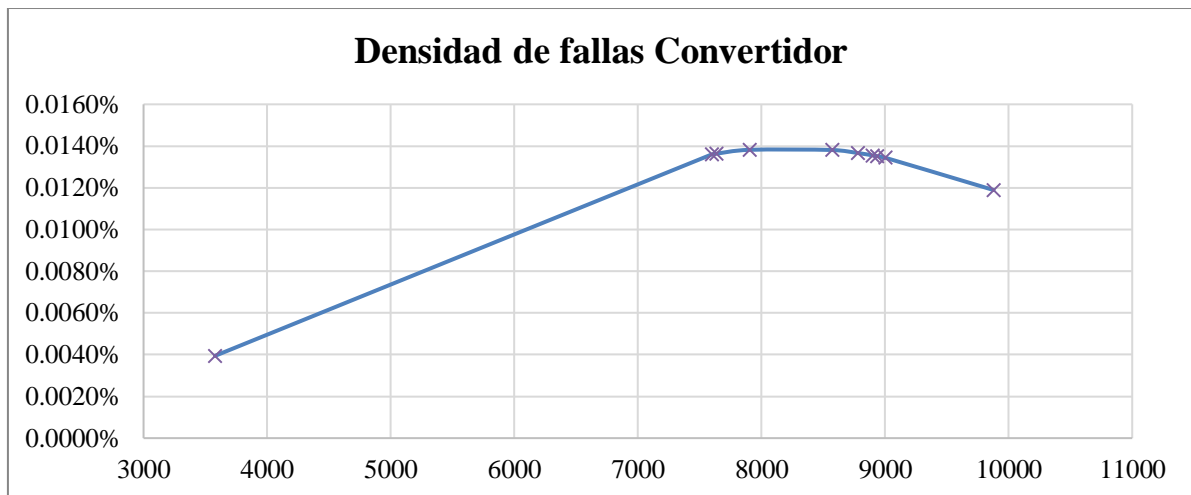
Orden	Tiempo entre fallas	Línea media % Acumulado de falla	Función de densidad de probabilidad PDF f(t)	Función de distribución acumulada CDF F(t)	Confiabilidad R(t)	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(t))))	Tasa de falla h(t)	Tasa acumulativa de falla H(t)
1	3578	6.7%	0.0039%	4.38%	95.6%	8.18	-2.66	4.12476E-05	0.044784712
2	7598	16.3%	0.0136%	41.47%	58.5%	8.94	-1.72	0.000232344	0.535700808
3	7632	26.0%	0.0136%	41.94%	58.1%	8.94	-1.20	0.000234738	0.543641166
4	7901	35.6%	0.0138%	45.63%	54.4%	8.97	-0.82	0.000254164	0.609378963
5	8569	45.2%	0.0138%	54.90%	45.1%	9.06	-0.51	0.000306213	0.796240469
6	8777	54.8%	0.0137%	57.76%	42.2%	9.08	-0.23	0.000323543	0.861725737
7	8898	64.4%	0.0136%	59.40%	40.6%	9.09	0.03	0.000333873	0.90149756
8	8933	74.0%	0.0135%	59.88%	40.1%	9.10	0.30	0.000336895	0.913235958
9	9001	83.7%	0.0134%	60.79%	39.2%	9.11	0.59	0.000342811	0.936345634
10	9878	93.3%	0.0119%	71.97%	28.0%	9.20	0.99	0.000424365	1.272034849

Fuente: Elaboración propia

β	3.30
η	9182.45
γ	0.000
R	0.849
R2	0.924
R ideal	1.000
Delta R	0.151

El valor de Beta β es de 3.30 es un indicador normal lo que indica que se tiene un comportamiento normal de falla por envejecimiento, el valor de Eta de 9182.45 indica que el 63.2% de los convertidores presentará esta falla en las primeras 9182.45 horas después del tiempo umbral.

Ilustración 11: Densidad de fallas convertidor



Fuente: Elaboración propia

El análisis de densidad de falla PDF $f(t)$ indica que la mayor densidad de fallas se encuentra alrededor de las 8569 horas, por lo cual se establecerá este horómetro para el análisis final de la evaluación de la estrategia de mantenimiento correctivo.

1.2.4 Diferencial

Se analiza las principales fallas del año 2018, además se toma como referencia el manual de operación y mantenimiento. Se define como la principal falla funcional a la falla de válvula de traba de diferencial.

Se utiliza un análisis de 10 eventos de falla, se tiene los siguientes resultados de acuerdo con el análisis de Weibull de 2 parámetros, el parámetro de densidad de falla determinará el valor al cual definiremos que se dio la falla funcional:

Tabla 17: Análisis de Weibull Diferencial

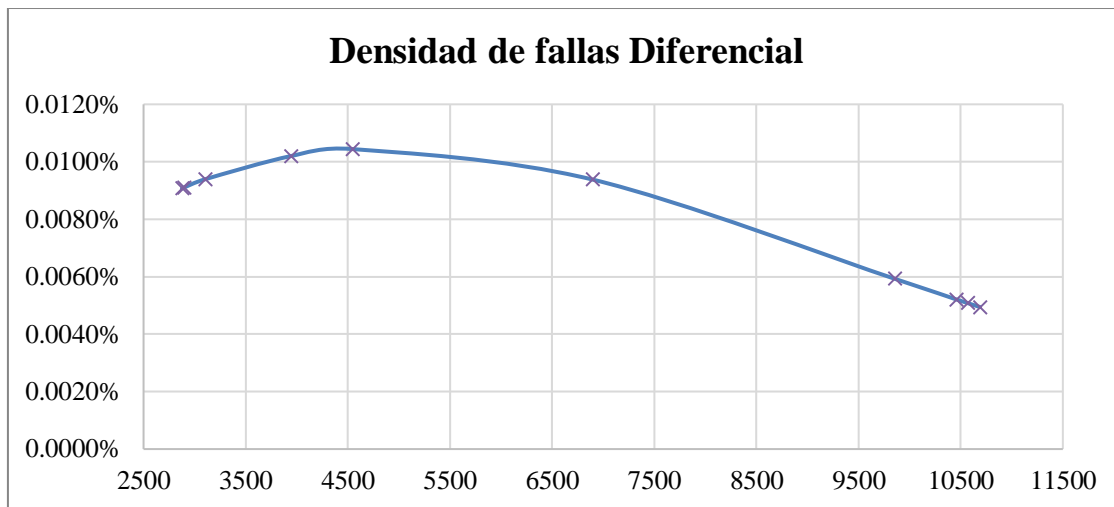
Orden	Tiempo entre fallas	Línea media % Acumulado de falla	Función de densidad de probabilidad PDF f(t)	Función de distribución acumulada CDF F(t)	Confiabilidad R(t)	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(t))))	Tasa de falla h(t)	Tasa acumulativa de falla H(t)
1	2876	6.7%	0.0091%	15.94%	84.1%	7.96	-2.66	0.000107928	0.173613894
2	2898	16.3%	0.0091%	16.14%	83.9%	7.97	-1.72	0.000108578	0.175995459
3	3102	26.0%	0.0094%	18.03%	82.0%	8.04	-1.20	0.000114556	0.198756569
4	3945	35.6%	0.0102%	26.32%	73.7%	8.28	-0.82	0.000138445	0.305481786
5	4543	45.2%	0.0104%	32.51%	67.5%	8.42	-0.51	0.000154728	0.393164805
6	6895	54.8%	0.0094%	56.35%	43.7%	8.84	-0.23	0.000214945	0.828939948
7	9855	64.4%	0.0059%	79.19%	20.8%	9.20	0.03	0.000284803	1.569867462
8	10456	74.0%	0.0052%	82.54%	17.5%	9.25	0.30	0.000298401	1.745128689
9	10567	83.7%	0.0051%	83.11%	16.9%	9.27	0.59	0.000300894	1.778389585
10	10689	93.3%	0.0049%	83.72%	16.3%	9.28	0.99	0.000303627	1.815265447

Fuente: Elaboración propia

β	1.79
η	7657.84
γ	0.000
R	0.920
R2	0.903
R ideal	1.000
Delta R	0.080

El valor de Beta β es de 1.79 es un valor que indica que el componente está dentro del tipo de fallas aleatorias con tendencia a incrementarse con el paso del tiempo, el valor de Eta de 7657.84 indica que el 63.2% de los diferenciales presentará esta falla en las primeras 7657.84 horas después del tiempo umbral.

Ilustración 12: Densidad de fallas diferencial



Fuente: Elaboración propia

El análisis de densidad de falla PDF $f(t)$ indica que la mayor densidad de fallas se encuentra alrededor de las 4543 horas, por lo cual se establecerá este horómetro para el análisis final de la evaluación de la estrategia de mantenimiento correctivo.

1.2.5 Mandos finales

Se analiza las principales fallas del año 2018, además se toma como referencia el manual de operación y mantenimiento. Se define como la principal falla funcional a la falla de semieje de mando final.

Se utiliza un análisis de 10 eventos de falla, se tiene los siguientes resultados de acuerdo con el análisis de Weibull de 2 parámetros, el parámetro de densidad de falla determinará el valor al cual definiremos que se dio la falla funcional:

Tabla 18: Análisis de Weibull Mando Final

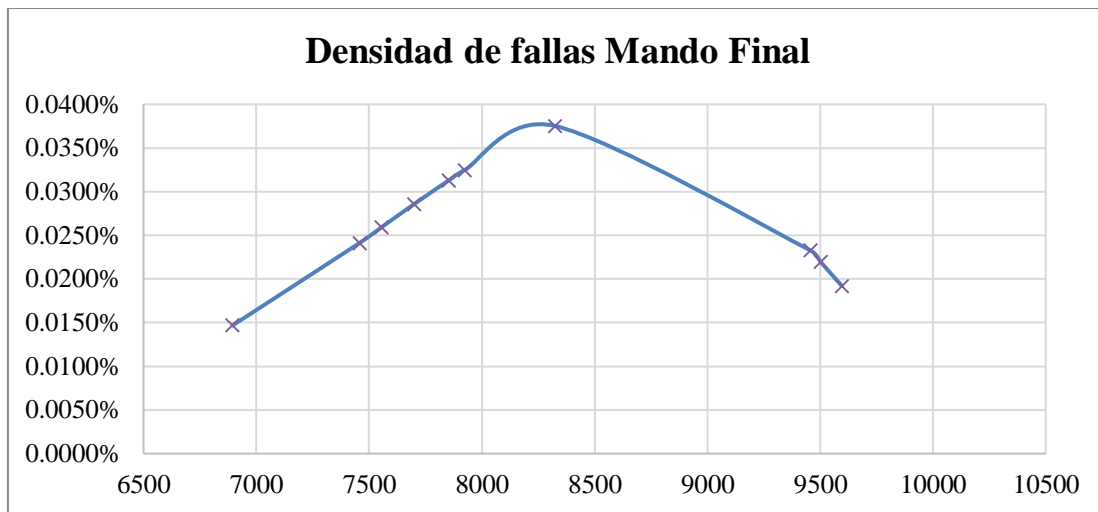
Orden	Tiempo entre fallas	Línea media % Acumulado de falla	Función de densidad de probabilidad PDF f(t)	Función de distribución acumulada CDF F(t)	Confiabilidad R(t)	ln (t)	ln(ln(1/(1-F(t))))	Tasa de falla h(t)	Tasa acumulativa de falla H(t)
1	6894	6.7%	0.0147%	11.98%	88.0%	8.84	-2.66	0.000166662	0.127653694
2	7457	16.3%	0.0241%	22.80%	77.2%	8.92	-1.72	0.00031232	0.258756277
3	7555	26.0%	0.0259%	25.25%	74.7%	8.93	-1.20	0.00034671	0.291023084
4	7699	35.6%	0.0286%	29.17%	70.8%	8.95	-0.82	0.000403246	0.344930282
5	7853	45.2%	0.0313%	33.78%	66.2%	8.97	-0.51	0.000472483	0.412238269
6	7923	54.8%	0.0325%	36.01%	64.0%	8.98	-0.23	0.000507249	0.446516271
7	8324	64.4%	0.0375%	50.16%	49.8%	9.03	0.03	0.000752963	0.696358204
8	9456	74.0%	0.0233%	88.85%	11.1%	9.15	0.30	0.002088393	2.194049995
9	9501	83.7%	0.0220%	89.87%	10.1%	9.16	0.59	0.002169244	2.289836769
10	9596	93.3%	0.0192%	91.83%	8.2%	9.17	0.99	0.002348976	2.504353144

Fuente: Elaboración propia

β	9.00
η	8665.50
γ	0.000
R	0.931
R2	0.847
R ideal	1.000
Delta R	0.069

El valor de Beta β es de 9 es un valor que indica que el componente está dentro del tipo de fallas aleatorias con tendencia a incrementarse con el paso del tiempo, el valor de Eta de 8665.5 indica que el 63.2% de los diferenciales presentará esta falla en las primeras 8665.5 horas después del tiempo umbral.

Ilustración 13: Densidad de fallas Mando Final



Fuente: Elaboración propia

El análisis de densidad de falla PDF $f(t)$ indica que la mayor densidad de fallas se encuentra alrededor de las 8324 horas, por lo cual se establecerá este horómetro para el análisis final de la evaluación de la estrategia de mantenimiento correctivo.

1.3 Impacto

Luego de analizar los parámetros de falla de cada componente principal del tren de fuerza, debemos analizar cómo afectará la confiabilidad global, la disponibilidad, la utilización, el nivel de TAT y los costos de mantenimiento.

Las horas de falla proyectadas para cada componente son:

Tabla 19: Horómetros para falla funcional

Componente	Horómetro de falla
Motor	2263
Transmisión	8903
Convertidor	8569
Diferencial	4543
Mandos Finales	8324

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la primera falla se dará a en el motor a las 2263 horas, se hará la proyección del cálculo de confiabilidad global y disponibilidad.

- Para el caso del motor C175, para un intervalo de tiempo de 2263 el valor de confiabilidad $R(t)$ será de 71.92%.

Tabla 20: Parámetros de confiabilidad de motor

Tiempo	2263.00
F(t)	28.08%
R(t)	71.92%
f(t)	0.02%
H (t)	0.33
MTBF (horas)	4201.59
MTBF nominal (horas)	4177.40

Fuente: Elaboración propia

- Para el caso de la Transmisión, para un intervalo de tiempo de 2263 el valor de confiabilidad $R(t)$ será de 99.99%.

Tabla 21: Parámetros de confiabilidad de transmisión

Tiempo	2263.00
F(t)	0.01%
R(t)	99.99%
f(t)	0.00%
H (t)	0.00
MTBF (horas)	8237.38
MTBF nominal (horas)	8250.80

Fuente: Elaboración propia

- Para el caso del convertidor, para un intervalo de tiempo de 2263 el valor de confiabilidad $R(t)$ será de 98.94%.

Tabla 22: Parámetros de confiabilidad de convertidor

Tiempo	2263.00
F(t)	1.06%
R(t)	98.94%
f(t)	0.00%
H (t)	0.01
MTBF (horas)	8410.16
MTBF nominal (horas)	8233.70

Fuente: Elaboración propia

- Para el caso del diferencial, para un intervalo de tiempo de 2263 el valor de confiabilidad $R(t)$ será de 89.31%.

Tabla 23: Parámetros de confiabilidad de diferencial

Tiempo	2263.00
F(t)	10.69%
R(t)	89.31%
f(t)	0.01%
H (t)	0.11
MTBF (horas)	6812.29
MTBF nominal (horas)	6582.60

Fuente: Elaboración propia

- Para el caso del mando final, para un intervalo de tiempo de 2263 el valor de confiabilidad $R(t)$ será de 99.99%.

Tabla 24: Parámetros de confiabilidad de mando final

Tiempo	2263.00
F(t)	0.001%
R(t)	99.999%
f(t)	0.00%
H (t)	0.00
MTBF (horas)	8205.96
MTBF nominal (horas)	8225.80

Fuente: Elaboración propia

Dado que el tren de fuerza es un sistema en serie, se multiplican las ratios de confiabilidad para obtener la confiabilidad del sistema de tren de fuerza considerando una estrategia correctiva, llevando a la falla funcional para luego realizar el cambio de componente.

Tabla 25: Confiabilidad del sistema de tren de fuerza

Componente	R(t)
Motor	71.92%
Transmisión	99.99%
Convertidor	98.94%
Diferencial	89.31%
Mandos Finales	99.99%
Confiabilidad sistema	63.54%

Fuente: Elaboración propia

La confiabilidad del sistema de tren de fuerza con una estrategia correctiva será de 63.54%, con dicha confiabilidad calcularemos la disponibilidad aparente en base al MTBF y MTTR del sistema con más baja confiabilidad, en este caso motor. Considerando un TAT⁴ de **72 días** para la reparación del motor, se tiene un MTTR de **1728 horas** (24x72). De ese modo se calcula una disponibilidad aparente de **70.86%**, lo que implica que no se cumplirá en ninguno de los casos con la utilización solicitada por operaciones mina.

Tabla 26: Cálculo de disponibilidad

Tiempo	2263.00
F(t)	28.08%
R(t)	71.92%
f(t)	0.02%
H (t)	0.33
MTBF (horas)	4201.59
MTBF nominal (horas)	4177.40
MTTR	1728.00
Disponibilidad aparente	70.86%

Fuente: Elaboración propia

⁴ TAT: Tiempo de atención en talleres

1.4 Proyección de costos

Adicionalmente se realiza el cálculo de costos, en base a la indisponibilidad y el costo de las reparaciones.

Se considera como costo base el costo total de posesión y operación de USD 704.81 detallado en la tabla 11.

Considerando un tiempo de vida promedio para el equipo de 62000 horas, antes de la baja, se realizará los siguientes cambios de componentes durante la vida del equipo utilizando una estrategia correctiva.

Tabla 27: Costo total de reparaciones de la estrategia de mantenimiento correctivo.

Componente	Horómetro de falla	Número de cambios (en 62000 horas)	Costo de reparación	Costo total durante ciclo de vida
Motor	2263	28	USD 120,000.00	USD 3,360,000.00
Transmisión	8903	7	USD 98,000.00	USD 686,000.00
Convertidor	8569	8	USD 79,500.00	USD 636,000.00
Diferencial	4543	14	USD 82,000.00	USD 1,148,000.00
Mandos Finales	8324	8	USD 34,200.00	USD 273,600.00
				USD 6,103,600.00

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente el costo de indisponibilidad por falla de componentes de tren de fuerza se calculará considerando un valor de indisponibilidad de 29.14 % y un tiempo de 9.98 años (donde el equipo acumulará 62000 de operación y 87496 horas en funcionamiento).

Como resultado tenemos que la indisponibilidad total en horas será durante el tiempo de vida del equipo será de 25496 horas, equivalente a 1062 días y 2.91 años.

El valor de costo de dicha indisponibilidad será de USD 17,970,141.05

En conclusión, considerando el costo de reparación y el costo de indisponibilidad por falla de sistema de tren fuerza tenemos que el costo de la estrategia correctiva durante el tiempo de vida del equipo será de USD **24,073,741.05**

2. Estrategia condicional

Una estrategia condicional se basa en analizar los parámetros de funcionamiento de los componentes para prevenir que estos fallen. Dentro de la estrategia de mantenimiento condicional tenemos al análisis de aceites, análisis vibracional, ultrasonido, entre otros.

El objetivo será analizar las técnicas de mantenimiento por condición para mitigar las fallas funcionales desarrolladas durante la estrategia correctiva. De la misma manera se realizará la proyección de costos considerando los costos utilización de las técnicas de monitoreo a utilizar, así como la disponibilidad y confiabilidad que se puede proyectar lograr.

De acuerdo con el manual de operación y mantenimiento y la experiencia en técnicas de mantenimiento predictivo se establecen las siguientes técnicas de análisis de condición para identificar la falla potencial e identificar la falla funcional.

- Para el caso del MOTOR tenemos a la falla del sistema de lubricación de motor como principal falla funcional. La falla del sistema de lubricación se deberá a 4 principales modos de falla: exceso de presión de bomba, baja presión de bomba, baja viscosidad de aceite de motor (por dilución) o elevada viscosidad (por oxidación o nitración). La estrategia para el monitoreo de condición de este tipo de modos de falla será el muestreo de aceite de motor (espectrometría atómica y

FTIR⁵, adicional a la evaluación de presiones y cambio de bomba de aceite por condición.

- Para el caso de la TRANSMISION tenemos la falla de las válvulas de control de la transmisión como principal falla funcional. El modo de falla principal es traba de spool de válvula por contaminación. La estrategia para el monitoreo de condición de este tipo de modos de falla será el muestreo de aceite de transmisión y evaluación de corriente de solenoide con ET. De ser necesario el cambio de aceite de transmisión o el cambio de la válvula moduladora de la transmisión con falla.
- Para el caso del CONVERTIDOR tenemos a la falla de la bomba de carga de convertidor como principal falla funcional. El modo de falla principal es la elevada presión de la bomba por elevada viscosidad (por oxidación o nitración). La estrategia para el monitoreo de condición de este tipo de modos de falla será el muestreo de aceite de transmisión y evaluación de corriente de solenoide con ET. De ser necesario el cambio de aceite de transmisión.
- Para el caso del DIFERENCIAL tenemos a la falla de válvula de traba de diferencial como principal falla funcional. El modo de falla principal es traba de spool de válvula por contaminación. La estrategia para el monitoreo de condición de este tipo de modos de falla será el muestreo de aceite de diferencial y evaluación de corriente de solenoide con ET. De ser necesario el cambio de aceite de diferencial o el cambio de control de traba de diferencial.

⁵ FTIR: espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier

- Para el caso de los MANDOS FINALES tenemos a la falla de semieje de mando final. El modo de falla principal es fisura de semieje. La estrategia de monitoreo será evaluación por ultrasonido y cambio de semieje por condición.

2.1 Procedimiento de cálculo de la frecuencia de inspección

El valor de intervalo entre inspecciones predictivas será directamente proporcional a tres factores: el factor de costo, el factor de falla y el factor de ajuste. Así la relación matemática estará definida como:

$$I=C \times F \times A$$

Donde:

C es el factor de costo: Se define como el costo de una inspección predictiva dividido entre el costo en que se incurre por no detectar la falla.

F es el factor de falla: Se define como la cantidad de fallas que pueden detectarse con la inspección predictiva dividida entre la tasa de fallas.

A es el factor de ajuste: Estará basado en la probabilidad de ocurrencia de más de 0 fallas en un año utilizando λ (tasa de fallas expresada como fallas por año).

- La relación del factor de costo es la siguiente:

$$C = C_i / C_f$$

Donde:

C_i es el costo de una inspección predictiva (en unidades monetarias)

C_f es el costo en que se incurre por no detectar la falla (en unidades monetarias)

- La relación del factor de falla es la siguiente:

$$F = \#Fi / \lambda$$

Donde:

#Fi es la cantidad de fallas que pueden ser detectados utilizando la tecnología predictiva (expresada en fallas por inspección) y λ es la tasa de fallas presentada por el equipo, y que, además, podrían ser detectadas por la tecnología predictiva a ser aplicada (expresada en fallas por año) Nótese que la unidad del factor de falla es años por inspección.

- La relación del factor de ajuste es la siguiente:

$$A = - \ln [1 - \text{EXP} (-\lambda)]$$

Para calcular este factor se utiliza la función matemática de probabilidad de Poisson: logaritmo natural multiplicada por -1 ($-\ln$), la cual, se comporta de una manera muy parecida al criterio gerencial de incremento o decremento del intervalo de inspección al tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de más de 0 fallas en un año. A mayor probabilidad de ocurrencia, el intervalo de inspección predictiva se reducirá de forma exponencial.

2.2 Cálculo de la frecuencia de inspección

2.2.1 Cálculo de la frecuencia de inspección Motor

Considerando los siguientes parámetros que actualmente el costo unitario de 3 muestras y evaluación de aceite de motor es de USD 1500.00, el costo de posesión y operación de USD 704.81 durante 1 hora de evaluación costo de reparación de motor es de USD 120,000.00 el valor de C es:

$$C = C_i / C_f = \text{USD } 1500 + 704.81 / \text{USD } 120000 = 0.00183$$

Considerando 16 modos de falla posibles combinados por inspección y un MTBF de 4201.59 (indicado en la Tabla 19) y una tasa de falla anual de 2.08 (resultado de la división de las horas operativas anuales 8760 sobre el MTBF) se tiene el siguiente valor de **F**:

$$F = 16 \text{ (número de fallas)} / 2.08 \text{ fallas por año} = 7.673 \text{ años/inspección}$$

Considerando una tasa de falla anual de 2.08, se tiene el siguiente valor de **A**:

$$A = -\ln [1 - \text{EXP} (-2.08)] = 0.13345$$

Finalmente, se calcula el valor de **I** en base a la multiplicación de

$$C \times F \times A.$$

$$I = 0.0184 \times 7.673 \times 0.133 = 0.0187$$

Para el cálculo de la frecuencia de inspección (**f**) calculamos el inverso del intervalo de inspección

$$f = 1/0.0187 = 53.44 \text{ veces al año}$$

Lo que equivale a una evaluación de aceite cada **163.89** horas.

2.2.2 Cálculo de la frecuencia de inspección Transmisión

Considerando los siguientes parámetros que actualmente el costo unitario de 3 muestras y evaluación de aceite de transmisión es de USD 1500.00, el costo de posesión y operación de USD 704.81 durante 1 hora de evaluación costo de reparación de transmisión es de USD 98,000.00 el valor de **C** es:

$$C=C_i/C_f= USD 1500 + 704.81 / USD 98000 = 0.0225$$

Considerando 3 modos de falla posibles combinados por inspección y un MTBF de 8237.38 (indicado en la Tabla 20) y una tasa de falla anual de 1.0634 (resultado de la división de las horas operativas anuales 8760 sobre el MTBF) se tiene el siguiente valor de **F**:

$$F= 3 \text{ (número de fallas)} / 1.0634 \text{ fallas por año} = 2.821 \text{ años/inspección}$$

Considerando una tasa de falla anual de 1.063, se tiene el siguiente valor de **A**:

$$A=-\ln [1-EXP (-1.063)]= 0.424$$

Finalmente, se calcula el valor de **I** en base a la multiplicación de

$$C \times F \times A.$$

$$I= 0.0225 \times 2.821 \times 0.4235 = 0.0269$$

Para el cálculo de la frecuencia de inspección (**f**) calculamos el inverso del intervalo de inspección

$$f = 1/0.0269 = 37.20 \text{ veces al año}$$

Lo que equivale a una evaluación de aceite cada **235.46** horas.

2.2.3 Cálculo de la frecuencia de inspección Convertidor

Considerando los siguientes parámetros que actualmente el costo unitario de 3 muestras y evaluación de aceite de transmisión es de USD 1500.00, el costo de posesión y operación de USD

704.81 durante 1 hora de evaluación costo de reparación de transmisión es de USD 79,500.00 el valor de C es:

$$C = C_i / C_f = USD 1500 + 704.81 / USD 79500 = 0.0277$$

Considerando 3 modos de falla posibles combinados por inspección y un MTBF de 8410.16 (indicado en la Tabla 21) y una tasa de falla anual de 1.0416 (resultado de la división de las horas operativas anuales 8760 sobre el MTBF) se tiene el siguiente valor de F :

$$F = 3 (\text{número de fallas}) / 1.0416 \text{ fallas por año} = 2.88 \text{ años/inspección}$$

Considerando una tasa de falla anual de 1.0416, se tiene el siguiente valor de A :

$$A = -\ln [1 - \text{EXP} (-1.0416)] = 0.435$$

Finalmente, se calcula el valor de I en base a la multiplicación de

$$C \times F \times A.$$

$$I = 0.0277 \times 2.88 \times 0.435 = 0.0347$$

Para el cálculo de la frecuencia de inspección (f) calculamos el inverso del intervalo de inspección

$$f = 1 / 0.0347 = 28.76 \text{ veces al año}$$

Lo que equivale a una evaluación de aceite cada **304.55** horas.

2.2.4 Cálculo de la frecuencia de inspección Diferencial

Considerando los siguientes parámetros que actualmente el costo unitario de 3 muestras y evaluación de aceite de diferencial

es de USD 1500.00, el costo de posesión y operación de USD 704.81 durante 1 hora de evaluación costo de reparación de transmisión es de USD 82,000 el valor de **C** es:

$$C=C_i/C_f= USD 1500 + 704.81 / USD 82000 = 0.0268$$

Considerando 3 modos de falla posibles combinados por inspección y un MTBF de 6812.29 (indicado en la Tabla 22) y una tasa de falla anual de 1.286 (resultado de la división de las horas operativas anuales 8760 sobre el MTBF) se tiene el siguiente valor de **F**:

$$F= 3 \text{ (número de fallas)} / 1.286 \text{ fallas por año} = 2.33 \text{ años/inspección}$$

Considerando una tasa de falla anual de 1.286, se tiene el siguiente valor de **A**:

$$A=-\ln [1-EXP (-1.286)]= 0.3235$$

Finalmente, se calcula el valor de **I** en base a la multiplicación de

$$C \times F \times A.$$

$$I= 0.0268 \times 2.33 \times 0.3235 = 0.02705$$

Para el cálculo de la frecuencia de inspección (**f**) calculamos el inverso del intervalo de inspección

$$f = 1/0.02705 = 49.37 \text{ veces al año}$$

Lo que equivale a una evaluación de aceite cada **177.77** horas.

2.2.5 Cálculo de la frecuencia de inspección Mando Final

Considerando los siguientes parámetros que actualmente el costo unitario de 3 muestras y evaluación de aceite de mando final es de USD 1500.00, el costo de posesión y operación de USD 704.81 durante 1 hora de evaluación y el costo de reparación del mando final es de USD 34,200 el valor de **C** es:

$$C=C_i/C_f= USD\ 1500 + 704.81 / USD\ 34200 = 0.0644681$$

Considerando 3 modos de falla posibles combinados por inspección y un MTBF de 8205.95 (indicado en la Tabla 23) y una tasa de falla anual de 1.0675 (resultado de la división de las horas operativas anuales 8760 sobre el MTBF) se tiene el siguiente valor de **F**:

$$F= 3 \text{ (número de fallas)} / 1.06751 \text{ fallas por año} = 2.81 \text{ años/inspección}$$

Considerando una tasa de falla anual de 1.0675, se tiene el siguiente valor de **A**:

$$A=-\ln [1-EXP (-1.0675)]= 0.421383$$

Finalmente, se calcula el valor de **I** en base a la multiplicación de

$$C \times F \times A.$$

$$I= 0.0644 \times 2.81 \times 0.4214 = 0.07663$$

Para el cálculo de la frecuencia de inspección (**f**) calculamos el inverso del intervalo de inspección

$$f = 1/0.07663= 13.09 \text{ veces al año}$$

Lo que equivale a una evaluación de aceite cada **668.76** horas.

2.3 Impacto

El uso de técnicas de monitoreo de condición para prevenir las fallas funcionales del componente se verá reflejada en una proyección de mejora en los KPI's sin embargo se debe considerar ciertos parámetros como la efectividad de las técnicas en monitoreo en base a la experiencia del área de monitoreo de la operación en base a OREDA.

El resumen de resultados de intervalos de inspección por componente es el siguiente:

Tabla 28: Intervalos de inspección por componente

Componente	Intervalo de inspección	Inspecciones al año
Motor	163.89	54.44
Transmisión	235.46	37.2
Convertidor	304.55	28.76
Diferencial	177.77	49.37
Mando final	668.76	13.09

Fuente: Elaboración propia

Considerando que actualmente el intervalo de PM's es de 250 horas, para el caso del motor es una evaluación el PM y como PRE-PM. Para la transmisión se realizará evaluación en cada PM. Para el convertidor se realizará evaluación en el PM. En el caso del diferencial la evaluación se realizará cada PM y en cada PRE-PM. Para los mandos finales se realizará evaluación cada 750 horas o PM3.

Se debe conocer la eficiencia de las evaluaciones del área de monitoreo para proyectar su impacto en la disponibilidad. Según OREDA depende la experiencia de los involucrados con el recojo y evaluación de muestras de aceite y análisis y establece un cuadro comparativo en base a la experiencia en diferentes industrias.

Tabla 29: Eficiencia de equipo predictivo

Años	Eficiencia
1	52.50%
2 a 3	67.50%
4 a 5	72.50%
6 a 8	82.50%
9 a 10	92.50%

Fuente: Handbook Oreda 2009

Considerando que el objetivo de disponibilidad de clase mundial es de 92.5%, atribuida por Caterpillar a sus equipos 797F Low altitude a nivel mundial. Por lo que se proyecta las siguientes ratios de disponibilidad y confiabilidad para los próximos 10 años partiendo de utilizar inicialmente una estrategia correctiva.

2.4 Proyección de costos

La tabla 30 muestra las ratios de disponibilidad, indisponibilidad y costos de indisponibilidad proyectado para 10 años utilizando la estrategia condicional.

Tabla 30: Costo de indisponibilidad estrategia condicional

Año	Disponibilidad esperada	Indisponibilidad	Costo de indisponibilidad
1	82.22%	17.78%	USD 1,096,396.36
2	85.47%	14.53%	USD 896,221.85
3	85.47%	14.53%	USD 896,221.85
4	86.55%	13.45%	USD 829,497.02
5	86.55%	13.45%	USD 829,497.02
6	88.71%	11.29%	USD 696,047.35
7	88.71%	11.29%	USD 696,047.35
8	88.71%	11.29%	USD 696,047.35
9	90.88%	9.12%	USD 562,597.67
10	90.88%	9.12%	USD 562,597.67
Total			USD 7,761,171.49

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Costo neto de estrategia condicional

Componente	Inspecciones en 10 años	Costo total (10 años)
Motor	544.4	USD 816,600.00
Transmisión	372	USD 558,000.00
Convertidor	287.6	USD 431,400.00
Diferencial	493.7	USD 740,550.00
Mando final	130.90	USD 196,350.00
Total		USD 2,742,900.00

Fuente: Elaboración propia

La tabla 31 muestra el costo total neto de utilizar la estrategia condicional en la vida útil del equipo de 10 años.

Finalmente definimos que el costo total de la estrategia condicional sumando el costo de indisponibilidad (Tabla 30) y el costo neto (Tabla 31) es de **USD 10,504,071.49**

3. Estrategia sistemática

Partiendo de los datos de la tabla 18 que detalla los horómetros para falla funcional definiremos cual será el mejor PCR para realizar el mantenimiento de manera sistemática.

Utilizaremos la herramienta de análisis de ciclo de vida y en base al costo definiremos el mejor PCR para componente.

3.1 Análisis de ciclo de vida de motor

Realizamos el análisis de intervalo óptimo de cambio según MTBF de 4201.59, costo de mantenimiento programado y costo de falla, obtenido el costo óptimo de USD 3,076,326.97. Se considera un tiempo de vida del equipo de 62000 horas.

Se realiza la proyección en la tabla 32, obteniendo que el mejor intervalo de cambio es a las **4995** horas, que será el intervalo de cambio de motor utilizando una estrategia sistemática.

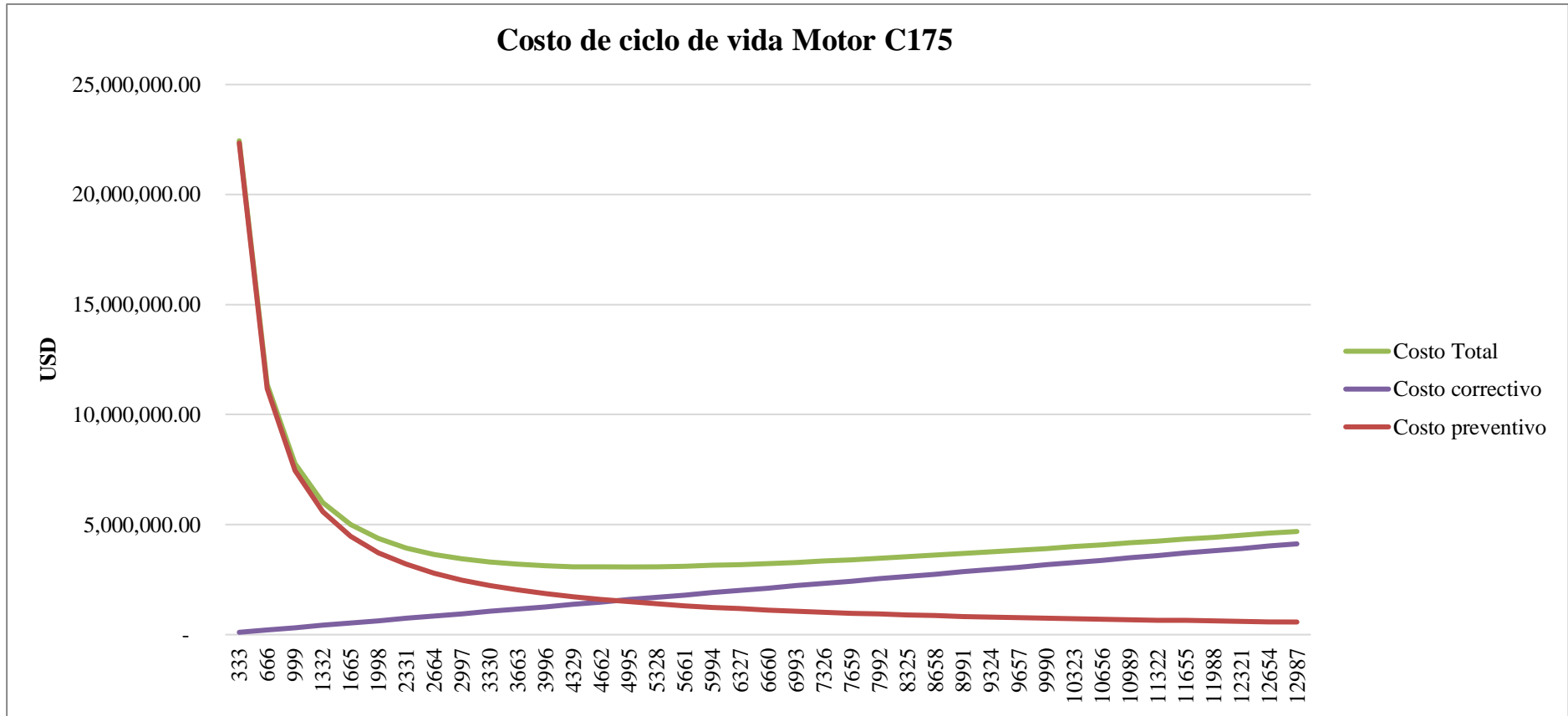
Tabla 32: Análisis ciclo de vida de motor

Intervalo	Frecuencia	Costo Tarea	Costo Total MP	N° fallas presentes	Costo tarea MC	Costo de falla	Costo Total
333	186.19	120,000.00	22,342,342.34	0.08	1,334,784.00	105,789.17	22,448,131.51
666	93.09	120,000.00	11,171,171.17	0.16	1,334,784.00	211,578.33	11,382,749.50
999	62.06	120,000.00	7,447,447.45	0.24	1,334,784.00	317,367.50	7,764,814.94
1332	46.55	120,000.00	5,585,585.59	0.32	1,334,784.00	423,156.66	6,008,742.25
1665	37.24	120,000.00	4,468,468.47	0.40	1,334,784.00	528,945.83	4,997,414.30
1998	31.03	120,000.00	3,723,723.72	0.48	1,334,784.00	634,734.99	4,358,458.72
2331	26.60	120,000.00	3,191,763.19	0.55	1,334,784.00	740,524.16	3,932,287.35
2664	23.27	120,000.00	2,792,792.79	0.63	1,334,784.00	846,313.32	3,639,106.12
2997	20.69	120,000.00	2,482,482.48	0.71	1,334,784.00	952,102.49	3,434,584.97
3330	18.62	120,000.00	2,234,234.23	0.79	1,334,784.00	1,057,891.65	3,292,125.89
3663	16.93	120,000.00	2,031,122.03	0.87	1,334,784.00	1,163,680.82	3,194,802.85
3996	15.52	120,000.00	1,861,861.86	0.95	1,334,784.00	1,269,469.98	3,131,331.85
4329	14.32	120,000.00	1,718,641.72	1.03	1,334,784.00	1,375,259.15	3,093,900.87
4662	13.30	120,000.00	1,595,881.60	1.11	1,334,784.00	1,481,048.32	3,076,929.91
4995	12.41	120,000.00	1,489,489.49	1.19	1,334,784.00	1,586,837.48	3,076,326.97
5328	11.64	120,000.00	1,396,396.40	1.27	1,334,784.00	1,692,626.65	3,089,023.04
5661	10.95	120,000.00	1,314,255.43	1.35	1,334,784.00	1,798,415.81	3,112,671.24
5994	10.34	120,000.00	1,241,241.24	1.43	1,334,784.00	1,904,204.98	3,145,446.22
6327	9.80	120,000.00	1,175,912.75	1.51	1,334,784.00	2,009,994.14	3,185,906.90
6660	9.31	120,000.00	1,117,117.12	1.59	1,334,784.00	2,115,783.31	3,232,900.42
6993	8.87	120,000.00	1,063,921.06	1.66	1,334,784.00	2,221,572.47	3,285,493.54
7326	8.46	120,000.00	1,015,561.02	1.74	1,334,784.00	2,327,361.64	3,342,922.65
7659	8.10	120,000.00	971,406.19	1.82	1,334,784.00	2,433,150.80	3,404,556.99
7992	7.76	120,000.00	930,930.93	1.90	1,334,784.00	2,538,939.97	3,469,870.90
8325	7.45	120,000.00	893,693.69	1.98	1,334,784.00	2,644,729.13	3,538,422.83
8658	7.16	120,000.00	859,320.86	2.06	1,334,784.00	2,750,518.30	3,609,839.16
8991	6.90	120,000.00	827,494.16	2.14	1,334,784.00	2,856,307.47	3,683,801.63
9324	6.65	120,000.00	797,940.80	2.22	1,334,784.00	2,962,096.63	3,760,037.43
9657	6.42	120,000.00	770,425.60	2.30	1,334,784.00	3,067,885.80	3,838,311.39
9990	6.21	120,000.00	744,744.74	2.38	1,334,784.00	3,173,674.96	3,918,419.71
10323	6.01	120,000.00	720,720.72	2.46	1,334,784.00	3,279,464.13	4,000,184.85
10656	5.82	120,000.00	698,198.20	2.54	1,334,784.00	3,385,253.29	4,083,451.49
10989	5.64	120,000.00	677,040.68	2.62	1,334,784.00	3,491,042.46	4,168,083.13
11322	5.48	120,000.00	657,127.72	2.69	1,334,784.00	3,596,831.62	4,253,959.34
11655	5.32	120,000.00	638,352.64	2.77	1,334,784.00	3,702,620.79	4,340,973.43
11988	5.17	120,000.00	620,620.62	2.85	1,334,784.00	3,808,409.95	4,429,030.57
12321	5.03	120,000.00	603,847.09	2.93	1,334,784.00	3,914,199.12	4,518,046.21
12654	4.90	120,000.00	587,956.38	3.01	1,334,784.00	4,019,988.28	4,607,944.66
12987	4.77	120,000.00	572,880.57	3.09	1,334,784.00	4,125,777.45	4,698,658.02

OPTIMO	3,076,326.97
---------------	---------------------

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 14: Análisis de ciclo de vida de motor



Fuente: Elaboración propia

3.2 Análisis de ciclo de vida de transmisión

Realizamos el análisis de intervalo óptimo de cambio según MTBF de 8237.38, costo de mantenimiento programado y costo de falla, obtenido el costo óptimo de USD 1,968,656.90. Se considera un tiempo de vida del equipo de 62000 horas.

Se realiza la proyección en la tabla 33, obteniendo que el mejor intervalo de cambio es a las **6327** horas, que será el intervalo de cambio de motor utilizando una estrategia sistemática.

3.3 Análisis de ciclo de vida de convertidor

Realizamos el análisis de intervalo óptimo de cambio según MTBF de 8410.16, costo de mantenimiento programado y costo de falla, obtenido el costo óptimo de USD 1,741,895.36. Se considera un tiempo de vida del equipo de 62000 horas.

Se realiza la proyección en la tabla 34, obteniendo que el mejor intervalo de cambio es a las **5661** horas, que será el intervalo de cambio de motor utilizando una estrategia sistemática.

3.4 Análisis de ciclo de vida de diferencial

Se considera el MTBF de 8205.96, obtenido el costo óptimo de USD 1,968,439.14. Con un intervalo de cambio de **5328** horas según lo indicado en la tabla 35.

3.5 Análisis de ciclo de vida de mando final

Se considera el MTBF de 9205.96, obtenido el costo óptimo de USD 1,136,394.90. Con un intervalo de cambio de **3663** horas según lo indicado en la tabla 36.

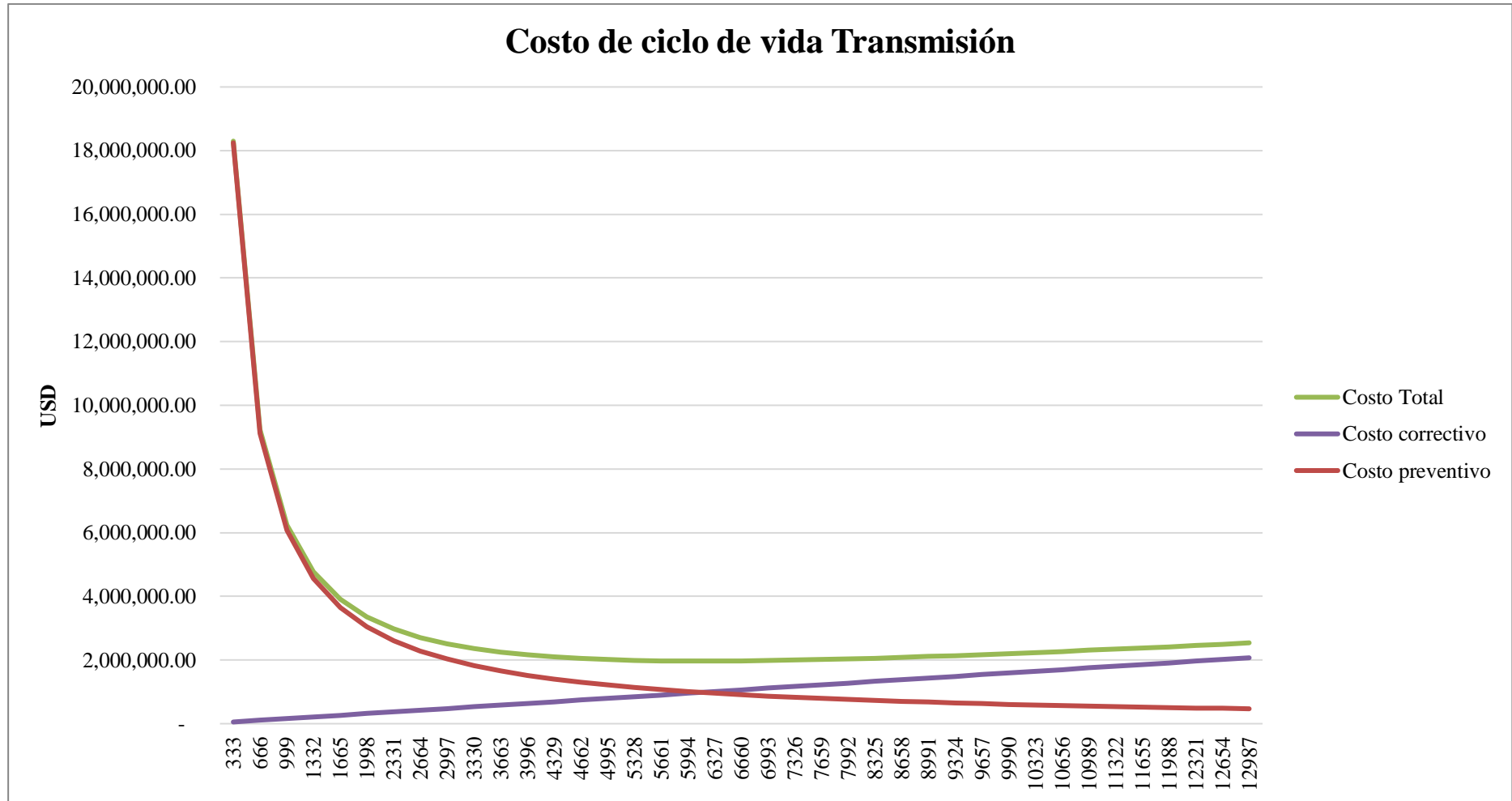
Tabla 33: Análisis ciclo de vida de transmisión

Intervalo	Frecuencia	Costo Tarea	Costo Total MP	N° fallas presentes	Costo tarea MC	Costo de falla	Costo Total
333	186.19	98,000.00	18,246,246.25	0.04	1,312,784.00	53,069.90	18,299,316.15
666	93.09	98,000.00	9,123,123.12	0.08	1,312,784.00	106,139.81	9,229,262.93
999	62.06	98,000.00	6,082,082.08	0.12	1,312,784.00	159,209.71	6,241,291.79
1332	46.55	98,000.00	4,561,561.56	0.16	1,312,784.00	212,279.61	4,773,841.17
1665	37.24	98,000.00	3,649,249.25	0.20	1,312,784.00	265,349.51	3,914,598.76
1998	31.03	98,000.00	3,041,041.04	0.24	1,312,784.00	318,419.42	3,359,460.46
2331	26.60	98,000.00	2,606,606.61	0.28	1,312,784.00	371,489.32	2,978,095.93
2664	23.27	98,000.00	2,280,780.78	0.32	1,312,784.00	424,559.22	2,705,340.00
2997	20.69	98,000.00	2,027,360.69	0.36	1,312,784.00	477,629.12	2,504,989.82
3330	18.62	98,000.00	1,824,624.62	0.40	1,312,784.00	530,699.03	2,355,323.65
3663	16.93	98,000.00	1,658,749.66	0.44	1,312,784.00	583,768.93	2,242,518.59
3996	15.52	98,000.00	1,520,520.52	0.49	1,312,784.00	636,838.83	2,157,359.35
4329	14.32	98,000.00	1,403,557.40	0.53	1,312,784.00	689,908.74	2,093,466.14
4662	13.30	98,000.00	1,303,303.30	0.57	1,312,784.00	742,978.64	2,046,281.94
4995	12.41	98,000.00	1,216,416.42	0.61	1,312,784.00	796,048.54	2,012,464.96
5328	11.64	98,000.00	1,140,390.39	0.65	1,312,784.00	849,118.44	1,989,508.83
5661	10.95	98,000.00	1,073,308.60	0.69	1,312,784.00	902,188.35	1,975,496.95
5994	10.34	98,000.00	1,013,680.35	0.73	1,312,784.00	955,258.25	1,968,938.60
6327	9.80	98,000.00	960,328.75	0.77	1,312,784.00	1,008,328.15	1,968,656.90
6660	9.31	98,000.00	912,312.31	0.81	1,312,784.00	1,061,398.05	1,973,710.37
6993	8.87	98,000.00	868,868.87	0.85	1,312,784.00	1,114,467.96	1,983,336.83
7326	8.46	98,000.00	829,374.83	0.89	1,312,784.00	1,167,537.86	1,996,912.69
7659	8.10	98,000.00	793,315.05	0.93	1,312,784.00	1,220,607.76	2,013,922.82
7992	7.76	98,000.00	760,260.26	0.97	1,312,784.00	1,273,677.66	2,033,937.93
8325	7.45	98,000.00	729,849.85	1.01	1,312,784.00	1,326,747.57	2,056,597.42
8658	7.16	98,000.00	701,778.70	1.05	1,312,784.00	1,379,817.47	2,081,596.17
8991	6.90	98,000.00	675,786.90	1.09	1,312,784.00	1,432,887.37	2,108,674.27
9324	6.65	98,000.00	651,651.65	1.13	1,312,784.00	1,485,957.28	2,137,608.93
9657	6.42	98,000.00	629,180.91	1.17	1,312,784.00	1,539,027.18	2,168,208.08
9990	6.21	98,000.00	608,208.21	1.21	1,312,784.00	1,592,097.08	2,200,305.29
10323	6.01	98,000.00	588,588.59	1.25	1,312,784.00	1,645,166.98	2,233,755.57
10656	5.82	98,000.00	570,195.20	1.29	1,312,784.00	1,698,236.89	2,268,432.08
10989	5.64	98,000.00	552,916.55	1.33	1,312,784.00	1,751,306.79	2,304,223.34
11322	5.48	98,000.00	536,654.30	1.37	1,312,784.00	1,804,376.69	2,341,030.99
11655	5.32	98,000.00	521,321.32	1.41	1,312,784.00	1,857,446.59	2,378,767.92
11988	5.17	98,000.00	506,840.17	1.46	1,312,784.00	1,910,516.50	2,417,356.67
12321	5.03	98,000.00	493,141.79	1.50	1,312,784.00	1,963,586.40	2,456,728.19
12654	4.90	98,000.00	480,164.37	1.54	1,312,784.00	2,016,656.30	2,496,820.68
12987	4.77	98,000.00	467,852.47	1.58	1,312,784.00	2,069,726.21	2,537,578.67

OPTIMO	1,968,656.90
---------------	---------------------

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 15: Análisis de ciclo de vida de transmisión



Fuente: Elaboración propia

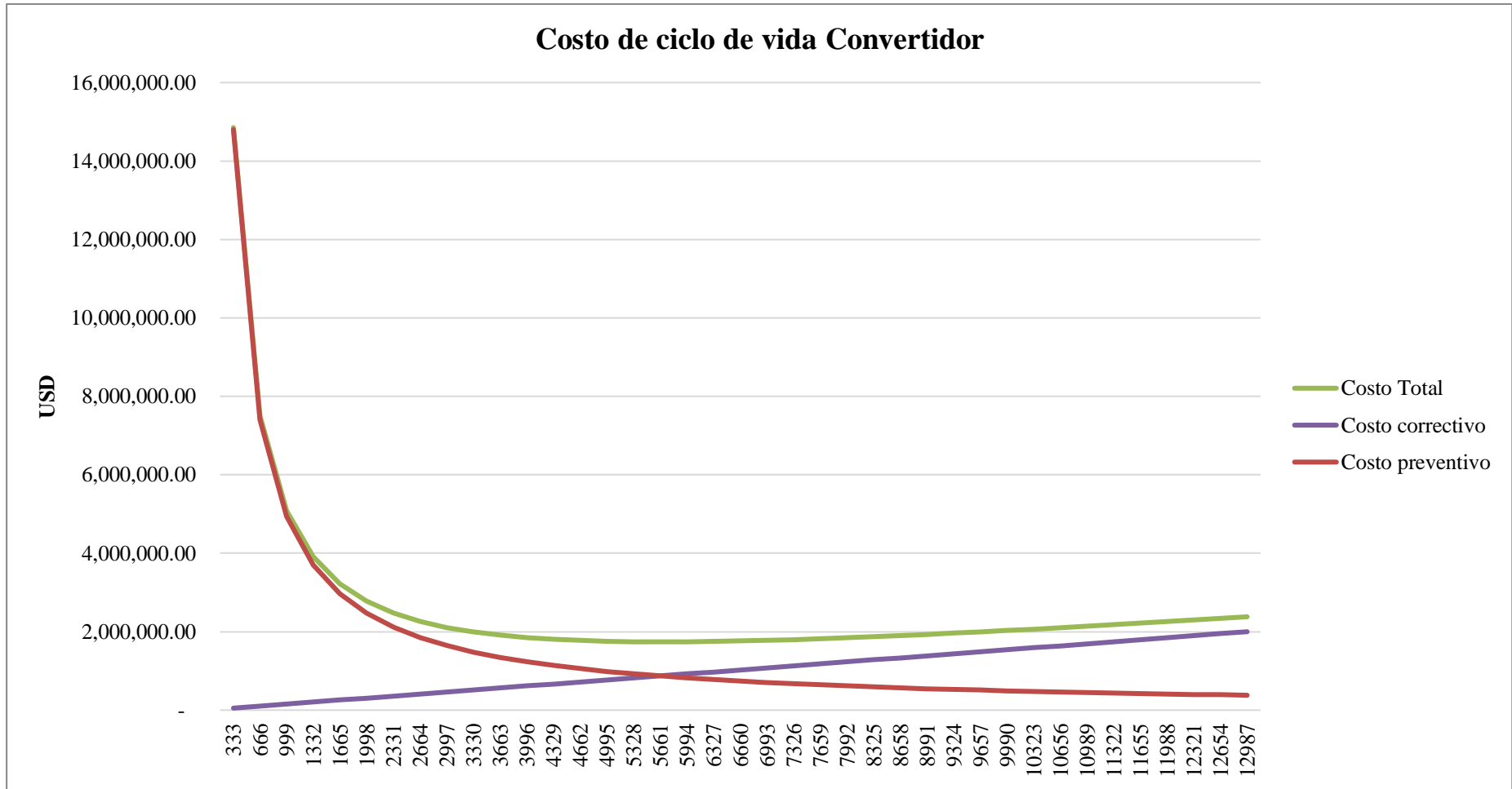
Tabla 34: Análisis ciclo de vida de convertidor

Intervalo	Frecuencia	Costo Tarea	Costo Total MP	N° fallas presentes	Costo tarea MC	Costo de falla	Costo Total
333	186.19	79,500.00	14,801,801.80	0.04	1,294,284.00	51,247.13	14,853,048.93
666	93.09	79,500.00	7,400,900.90	0.08	1,294,284.00	102,494.25	7,503,395.15
999	62.06	79,500.00	4,933,933.93	0.12	1,294,284.00	153,741.38	5,087,675.31
1332	46.55	79,500.00	3,700,450.45	0.16	1,294,284.00	204,988.50	3,905,438.95
1665	37.24	79,500.00	2,960,360.36	0.20	1,294,284.00	256,235.63	3,216,595.99
1998	31.03	79,500.00	2,466,966.97	0.24	1,294,284.00	307,482.76	2,774,449.72
2331	26.60	79,500.00	2,114,543.11	0.28	1,294,284.00	358,729.88	2,473,273.00
2664	23.27	79,500.00	1,850,225.23	0.32	1,294,284.00	409,977.01	2,260,202.23
2997	20.69	79,500.00	1,644,644.64	0.36	1,294,284.00	461,224.13	2,105,868.78
3330	18.62	79,500.00	1,480,180.18	0.40	1,294,284.00	512,471.26	1,992,651.44
3663	16.93	79,500.00	1,345,618.35	0.44	1,294,284.00	563,718.38	1,909,336.73
3996	15.52	79,500.00	1,233,483.48	0.48	1,294,284.00	614,965.51	1,848,448.99
4329	14.32	79,500.00	1,138,600.14	0.51	1,294,284.00	666,212.64	1,804,812.77
4662	13.30	79,500.00	1,057,271.56	0.55	1,294,284.00	717,459.76	1,774,731.32
4995	12.41	79,500.00	986,786.79	0.59	1,294,284.00	768,706.89	1,755,493.67
5328	11.64	79,500.00	925,112.61	0.63	1,294,284.00	819,954.01	1,745,066.63
5661	10.95	79,500.00	870,694.22	0.67	1,294,284.00	871,201.14	1,741,895.36
5994	10.34	79,500.00	822,322.32	0.71	1,294,284.00	922,448.27	1,744,770.59
6327	9.80	79,500.00	779,042.20	0.75	1,294,284.00	973,695.39	1,752,737.59
6660	9.31	79,500.00	740,090.09	0.79	1,294,284.00	1,024,942.52	1,765,032.61
6993	8.87	79,500.00	704,847.70	0.83	1,294,284.00	1,076,189.64	1,781,037.35
7326	8.46	79,500.00	672,809.17	0.87	1,294,284.00	1,127,436.77	1,800,245.94
7659	8.10	79,500.00	643,556.60	0.91	1,294,284.00	1,178,683.89	1,822,240.49
7992	7.76	79,500.00	616,741.74	0.95	1,294,284.00	1,229,931.02	1,846,672.76
8325	7.45	79,500.00	592,072.07	0.99	1,294,284.00	1,281,178.15	1,873,250.22
8658	7.16	79,500.00	569,300.07	1.03	1,294,284.00	1,332,425.27	1,901,725.34
8991	6.90	79,500.00	548,214.88	1.07	1,294,284.00	1,383,672.40	1,931,887.28
9324	6.65	79,500.00	528,635.78	1.11	1,294,284.00	1,434,919.52	1,963,555.30
9657	6.42	79,500.00	510,406.96	1.15	1,294,284.00	1,486,166.65	1,996,573.61
9990	6.21	79,500.00	493,393.39	1.19	1,294,284.00	1,537,413.78	2,030,807.17
10323	6.01	79,500.00	477,477.48	1.23	1,294,284.00	1,588,660.90	2,066,138.38
10656	5.82	79,500.00	462,556.31	1.27	1,294,284.00	1,639,908.03	2,102,464.33
10989	5.64	79,500.00	448,539.45	1.31	1,294,284.00	1,691,155.15	2,139,694.60
11322	5.48	79,500.00	435,347.11	1.35	1,294,284.00	1,742,402.28	2,177,749.39
11655	5.32	79,500.00	422,908.62	1.39	1,294,284.00	1,793,649.41	2,216,558.03
11988	5.17	79,500.00	411,161.16	1.43	1,294,284.00	1,844,896.53	2,256,057.69
12321	5.03	79,500.00	400,048.70	1.47	1,294,284.00	1,896,143.66	2,296,192.35
12654	4.90	79,500.00	389,521.10	1.50	1,294,284.00	1,947,390.78	2,336,911.88
12987	4.77	79,500.00	379,533.38	1.54	1,294,284.00	1,998,637.91	2,378,171.29

OPTIMO	1,741,895.36
--------	--------------

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 16: Análisis de ciclo de vida de convertidor



Fuente: Elaboración propia

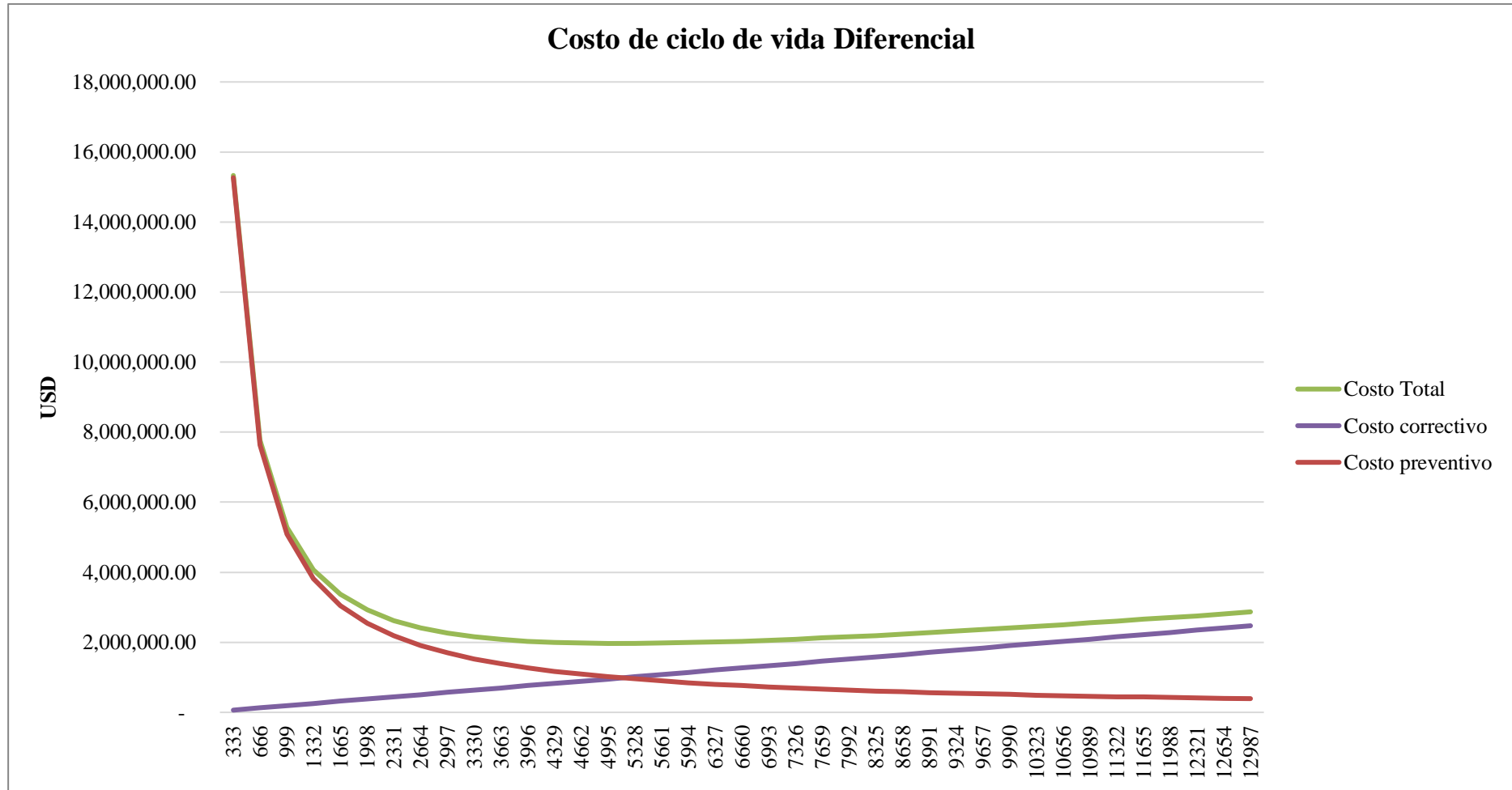
Tabla 35: Análisis ciclo de vida de diferencial

Intervalo	Frecuencia	Costo Tarea	Costo Total MP	N° fallas presentes	Costo tarea MC	Costo de falla	Costo Total
333	186.19	82,000.00	15,267,267.27	0.05	1,296,784.00	63,389.68	15,330,656.95
666	93.09	82,000.00	7,633,633.63	0.10	1,296,784.00	126,779.37	7,760,413.00
999	62.06	82,000.00	5,089,089.09	0.15	1,296,784.00	190,169.05	5,279,258.14
1332	46.55	82,000.00	3,816,816.82	0.20	1,296,784.00	253,558.74	4,070,375.55
1665	37.24	82,000.00	3,053,453.45	0.24	1,296,784.00	316,948.42	3,370,401.87
1998	31.03	82,000.00	2,544,544.54	0.29	1,296,784.00	380,338.10	2,924,882.65
2331	26.60	82,000.00	2,181,038.18	0.34	1,296,784.00	443,727.79	2,624,765.97
2664	23.27	82,000.00	1,908,408.41	0.39	1,296,784.00	507,117.47	2,415,525.88
2997	20.69	82,000.00	1,696,363.03	0.44	1,296,784.00	570,507.15	2,266,870.18
3330	18.62	82,000.00	1,526,726.73	0.49	1,296,784.00	633,896.84	2,160,623.56
3663	16.93	82,000.00	1,387,933.39	0.54	1,296,784.00	697,286.52	2,085,219.91
3996	15.52	82,000.00	1,272,272.27	0.59	1,296,784.00	760,676.21	2,032,948.48
4329	14.32	82,000.00	1,174,405.17	0.64	1,296,784.00	824,065.89	1,998,471.06
4662	13.30	82,000.00	1,090,519.09	0.68	1,296,784.00	887,455.57	1,977,974.66
4995	12.41	82,000.00	1,017,817.82	0.73	1,296,784.00	950,845.26	1,968,663.07
5328	11.64	82,000.00	954,204.20	0.78	1,296,784.00	1,014,234.94	1,968,439.14
5661	10.95	82,000.00	898,074.55	0.83	1,296,784.00	1,077,624.62	1,975,699.17
5994	10.34	82,000.00	848,181.51	0.88	1,296,784.00	1,141,014.31	1,989,195.82
6327	9.80	82,000.00	803,540.38	0.93	1,296,784.00	1,204,403.99	2,007,944.37
6660	9.31	82,000.00	763,363.36	0.98	1,296,784.00	1,267,793.68	2,031,157.04
6993	8.87	82,000.00	727,012.73	1.03	1,296,784.00	1,331,183.36	2,058,196.09
7326	8.46	82,000.00	693,966.69	1.08	1,296,784.00	1,394,573.04	2,088,539.74
7659	8.10	82,000.00	663,794.23	1.12	1,296,784.00	1,457,962.73	2,121,756.96
7992	7.76	82,000.00	636,136.14	1.17	1,296,784.00	1,521,352.41	2,157,488.55
8325	7.45	82,000.00	610,690.69	1.22	1,296,784.00	1,584,742.09	2,195,432.78
8658	7.16	82,000.00	587,202.59	1.27	1,296,784.00	1,648,131.78	2,235,334.37
8991	6.90	82,000.00	565,454.34	1.32	1,296,784.00	1,711,521.46	2,276,975.80
9324	6.65	82,000.00	545,259.55	1.37	1,296,784.00	1,774,911.15	2,320,170.69
9657	6.42	82,000.00	526,457.49	1.42	1,296,784.00	1,838,300.83	2,364,758.32
9990	6.21	82,000.00	508,908.91	1.47	1,296,784.00	1,901,690.51	2,410,599.42
10323	6.01	82,000.00	492,492.49	1.52	1,296,784.00	1,965,080.20	2,457,572.69
10656	5.82	82,000.00	477,102.10	1.56	1,296,784.00	2,028,469.88	2,505,571.98
10989	5.64	82,000.00	462,644.46	1.61	1,296,784.00	2,091,859.56	2,554,504.03
11322	5.48	82,000.00	449,037.27	1.66	1,296,784.00	2,155,249.25	2,604,286.52
11655	5.32	82,000.00	436,207.64	1.71	1,296,784.00	2,218,638.93	2,654,846.57
11988	5.17	82,000.00	424,090.76	1.76	1,296,784.00	2,282,028.62	2,706,119.37
12321	5.03	82,000.00	412,628.85	1.81	1,296,784.00	2,345,418.30	2,758,047.14
12654	4.90	82,000.00	401,770.19	1.86	1,296,784.00	2,408,807.98	2,810,578.17
12987	4.77	82,000.00	391,468.39	1.91	1,296,784.00	2,472,197.67	2,863,666.06

OPTIMO	1,968,439.14
--------	--------------

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17: Análisis de ciclo de vida de diferencial



Fuente: Elaboración propia

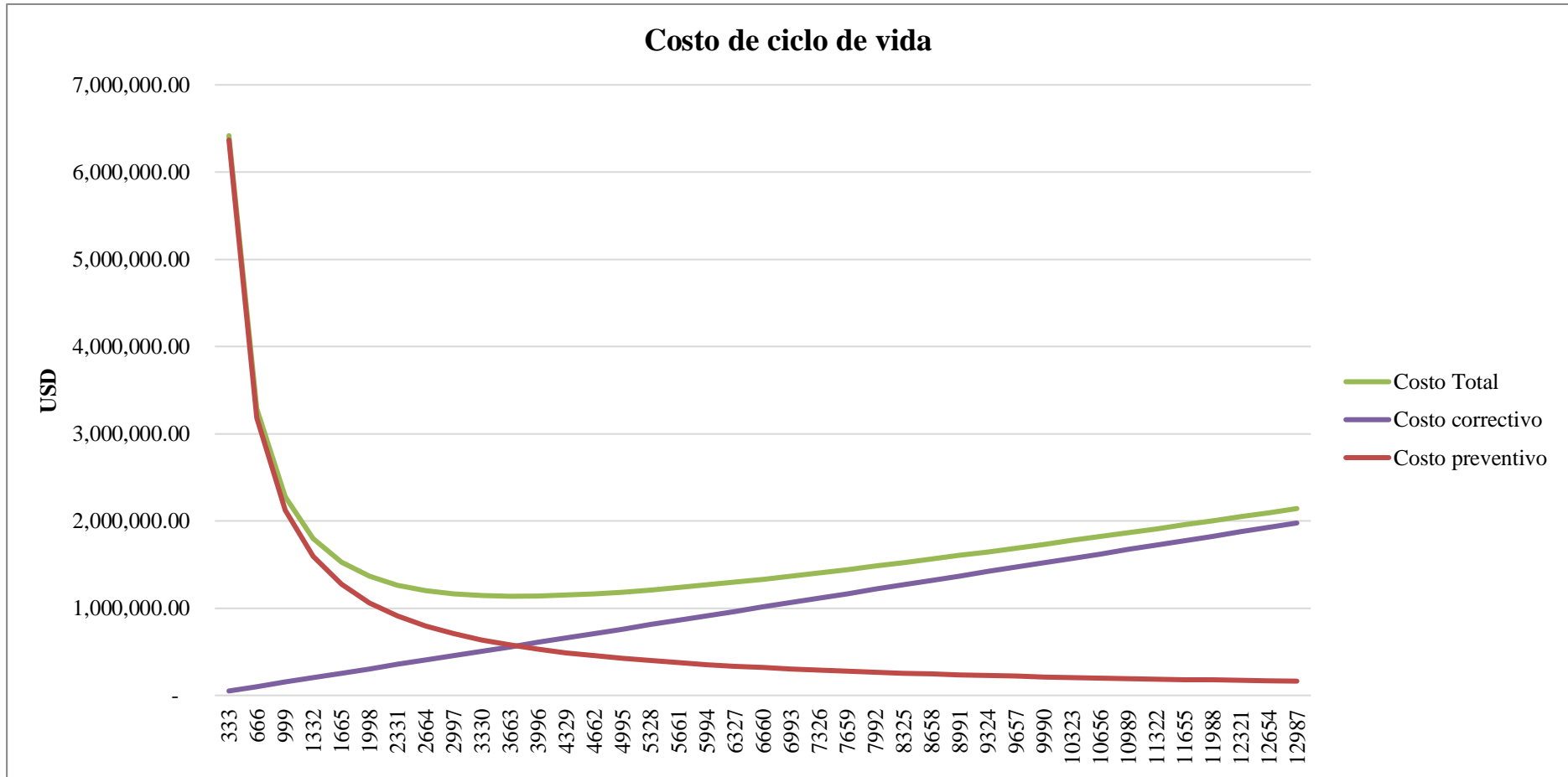
Tabla 36: Análisis ciclo de vida de mando final

Intervalo	Frecuencia	Costo Tarea	Costo Total MP	N° fallas presentes	Costo tarea MC	Costo de falla	Costo Total
333	186.19	34,200.00	6,367,567.57	0.04	1,248,984.00	50,684.10	6,418,251.67
666	93.09	34,200.00	3,183,783.78	0.08	1,248,984.00	101,368.20	3,285,151.99
999	62.06	34,200.00	2,122,522.52	0.12	1,248,984.00	152,052.31	2,274,574.83
1332	46.55	34,200.00	1,591,891.89	0.16	1,248,984.00	202,736.41	1,794,628.30
1665	37.24	34,200.00	1,273,513.51	0.20	1,248,984.00	253,420.51	1,526,934.02
1998	31.03	34,200.00	1,061,261.26	0.24	1,248,984.00	304,104.61	1,365,365.87
2331	26.60	34,200.00	909,652.51	0.28	1,248,984.00	354,788.72	1,264,441.23
2664	23.27	34,200.00	795,945.95	0.32	1,248,984.00	405,472.82	1,201,418.76
2997	20.69	34,200.00	707,507.51	0.37	1,248,984.00	456,156.92	1,163,664.43
3330	18.62	34,200.00	636,756.76	0.41	1,248,984.00	506,841.02	1,143,597.78
3663	16.93	34,200.00	578,869.78	0.45	1,248,984.00	557,525.12	1,136,394.90
3996	15.52	34,200.00	530,630.63	0.49	1,248,984.00	608,209.23	1,138,839.86
4329	14.32	34,200.00	489,812.89	0.53	1,248,984.00	658,893.33	1,148,706.22
4662	13.30	34,200.00	454,826.25	0.57	1,248,984.00	709,577.43	1,164,403.69
4995	12.41	34,200.00	424,504.50	0.61	1,248,984.00	760,261.53	1,184,766.04
5328	11.64	34,200.00	397,972.97	0.65	1,248,984.00	810,945.64	1,208,918.61
5661	10.95	34,200.00	374,562.80	0.69	1,248,984.00	861,629.74	1,236,192.54
5994	10.34	34,200.00	353,753.75	0.73	1,248,984.00	912,313.84	1,266,067.59
6327	9.80	34,200.00	335,135.14	0.77	1,248,984.00	962,997.94	1,298,133.08
6660	9.31	34,200.00	318,378.38	0.81	1,248,984.00	1,013,682.04	1,332,060.42
6993	8.87	34,200.00	303,217.50	0.85	1,248,984.00	1,064,366.15	1,367,583.65
7326	8.46	34,200.00	289,434.89	0.89	1,248,984.00	1,115,050.25	1,404,485.14
7659	8.10	34,200.00	276,850.76	0.93	1,248,984.00	1,165,734.35	1,442,585.11
7992	7.76	34,200.00	265,315.32	0.97	1,248,984.00	1,216,418.45	1,481,733.77
8325	7.45	34,200.00	254,702.70	1.01	1,248,984.00	1,267,102.56	1,521,805.26
8658	7.16	34,200.00	244,906.44	1.06	1,248,984.00	1,317,786.66	1,562,693.10
8991	6.90	34,200.00	235,835.84	1.10	1,248,984.00	1,368,470.76	1,604,306.60
9324	6.65	34,200.00	227,413.13	1.14	1,248,984.00	1,419,154.86	1,646,567.99
9657	6.42	34,200.00	219,571.30	1.18	1,248,984.00	1,469,838.96	1,689,410.26
9990	6.21	34,200.00	212,252.25	1.22	1,248,984.00	1,520,523.07	1,732,775.32
10323	6.01	34,200.00	205,405.41	1.26	1,248,984.00	1,571,207.17	1,776,612.57
10656	5.82	34,200.00	198,986.49	1.30	1,248,984.00	1,621,891.27	1,820,877.76
10989	5.64	34,200.00	192,956.59	1.34	1,248,984.00	1,672,575.37	1,865,531.97
11322	5.48	34,200.00	187,281.40	1.38	1,248,984.00	1,723,259.48	1,910,540.87
11655	5.32	34,200.00	181,930.50	1.42	1,248,984.00	1,773,943.58	1,955,874.08
11988	5.17	34,200.00	176,876.88	1.46	1,248,984.00	1,824,627.68	2,001,504.56
12321	5.03	34,200.00	172,096.42	1.50	1,248,984.00	1,875,311.78	2,047,408.20
12654	4.90	34,200.00	167,567.57	1.54	1,248,984.00	1,925,995.88	2,093,563.45
12987	4.77	34,200.00	163,270.96	1.58	1,248,984.00	1,976,679.99	2,139,950.95

OPTIMO	1,136,394.90
--------	--------------

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18: Análisis de ciclo de vida de mando final



Fuente: Elaboración propia

Después del análisis, definimos los siguientes PCR en base a lo calculado en el análisis de ciclo de vida para cada componente del tren de fuerza.

Tabla 37: Horómetro de cambio optimo según análisis de ciclo de vida

Componente	Cambio optimo CCL
Motor	4995
Transmisión	6327
Convertidor	5661
Diferencial	5328
Mando final	3663

Fuente: Elaboración propia

Con dichos horómetros calculamos la confiabilidad del sistema, primero definimos la confiabilidad por cada componente de acuerdo con el horómetro de cambio óptimo.

Motor:

Tabla 38: Confiabilidad de motor por PRC óptimo

Tiempo	4995
F(t)	67.05%
R(t)	32.95%
f(t)	0.01%
H (t)	1.11

Fuente: Elaboración propia

Transmisión:

Tabla 39: Confiabilidad de transmisión por PRC óptimo

Tiempo	6327.00
F(t)	9.27%
R(t)	90.73%
f(t)	0.01%
H (t)	0.10

Fuente: Elaboración propia

Convertidor:

Tabla 40: Confiabilidad de convertidor por PRC óptimo

Tiempo	5661.00
F(t)	18.04%
R(t)	81.96%
f(t)	0.01%
H (t)	0.20

Fuente: Elaboración propia

Diferencial:

Tabla 41: Confiabilidad de diferencial por PRC óptimo

Tiempo	5328
F(t)	40.71%
R(t)	59.29%
f(t)	0.01%
H (t)	0.52

Fuente: Elaboración propia

Mandos finales:

Tabla 42: Confiabilidad de mando final por PRC óptimo

Tiempo	3663.00
F(t)	0.043%
R(t)	99.957%
f(t)	0.00%
H (t)	0.00

Fuente: Elaboración propia

Considerando que el sistema de tren de fuerza es un sistema en serie, la confiabilidad global del sistema de tren de fuerza considerando una estrategia de mantenimiento sistemática será:

Tabla 43: Confiabilidad del sistema de tren de fuerza por estrategia sistemática

Componente	R(t)
Motor	32.95%
Transmisión	90.73%
Convertidor	81.96%
Diferencial	59.29%
Mandos Finales	99.96%
Confiabilidad sistema	14.52%

Fuente: Elaboración propia

3.6 Proyección de costos

Utilizando lo revisado en la estrategia sistemática de mantenimiento los costos durante el tiempo de vida del camión 797F estimada en 10 años será de **USD 9,891,713.27** como lo detallado en la table 43.

Tabla 44: Costo total de estrategia sistemática de mantenimiento

Componente	Costo
Motor	USD 3,076,326.97
Transmisión	USD 1,968,656.90
Convertidor	USD 1,741,895.36
Diferencial	USD 1,968,439.14
Mando final	USD 1,136,394.90
Total	USD 9,891,713.27

Fuente: Elaboración propia

4. Estrategia de alta disponibilidad

La estrategia de alta disponibilidad se enfoca en obtener la más alta disponibilidad contemplando básicamente reducir los tiempos de indisponibilidad compensando la confiabilidad en los equipos.

4.1 Cálculo de componentes para una alta disponibilidad

Considerando la base de una estrategia correctiva, se proyecta la siguiente cantidad de componentes a tener en spare para lograr una disponibilidad aparente de 92.5%.

Tabla 45: Cantidad de componentes por equipo para obtener una disponibilidad de 92.5%

Componente	Cantidad
Motor	4
Transmisión	5
Convertidor	4
Diferencial	8
Mandos Finales	12

Fuente: Elaboración propia

Esta cantidad de componentes por equipo estima una inversión anual en componentes por spare de **USD 3,520,000.00** y de **USD 35,200,000.00** para la vida del equipo (10 años).

Tabla 46: Costo de estrategia de alta disponibilidad

Componente	Cantidad	Costo de componente	Total
Motor	1	USD 1,200,000.00	USD 1,200,000.00
Transmisión	1	USD 790,000.00	USD 790,000.00
Convertidor	1	USD 540,000.00	USD 540,000.00
Diferencial	1	USD 620,000.00	USD 620,000.00
Mandos Finales	2	USD 185,000.00	USD 370,000.00
		Total	USD 3,520,000.00

Fuente: Elaboración propia

5. Estrategia aplicando ingeniería de confiabilidad

La estrategia de mantenimiento aplicando ingeniería de confiabilidad a diferencia de las demás estrategias tiene base importante en el análisis de modos de falla del equipo. Estos generalmente se aplican a los equipos más críticos los cuales por circunstancias operativas requieren una mayor priorización de operación, por lo cual es recomendable hacer un mantenimiento basado en RCM, para lo cual es importante seguir la metodología de John Moubray plasmada en su obra RCM II.

5.1 Identificación de fallas funcionales

Tabla 47: Fallas funcionales del tren de fuerza

Hoja de trabajo de información		Sistema: Camión CAT 797F
RCM II		Sub. Sistema: Tren de fuerza
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Generar una potencia al equipo de 4000 Hp para poder trasladarse a una velocidad máxima de 68 km/h en terreno accidentado, con una carga de 400 Ton	A. Motor no arranca
		B. Motor ofrece picos de rendimiento menores a 4000 Hp (calado)
		C. El equipo alcanza velocidades inferiores a 68 km / h
		D. El equipo tiene capacidades de carguío muy inferiores a 400 toneladas
		E. El equipo no puede movilizarse con carga máxima

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48: Fallas funcionales del sistema del sistema de dirección y frenos

Hoja de trabajo de información RCM II		Sistema: Camión CAT 797F
		Sub. Sistema: Sistema de frenos y dirección
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Ofrecer capacidad de frenado y control de dirección del equipo en movimiento	A. Paquete de embragues de dirección gastados
		B. Paquetes de freno gastados
		C. Sistema hidráulico inoperativo
		D. Solenoides dañados
		E. Resortes tipo Belleville desgastados

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49: Fallas funcionales del sistema de enfriamiento

Hoja de trabajo de información RCM II		Sistema: Camión CAT 797F
		Sub. Sistema: Sistema de enfriamiento
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Mantener una temperatura adecuado de acuerdo con cada componente según especificaciones técnicas de fabricante	A. Radiador modular dañado
		B. Índice de refrigerante por debajo del nivel
		C. Perdida de refrigerante por fugas
		D. Disipadores siniestrados

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50: Fallas funcionales del sistema hidráulico

		Sistema: Camión CAT 797F
Hoja de trabajo de información RCM II		Sub. Sistema: Sistema hidráulico
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Facilitar la manipulación de componentes principales en el levante y acarreo de material mediante aceite hidráulico	A. Bombas hidráulicas inoperativas
		B. Mangueras hidráulicas rotas
		c. Sistema de arranque averiado
		d. Solenoides dañados
		e. Sensores dañados

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51: Fallas funcionales del sistema eléctrico

Hoja de trabajo de información RCM II		Sistema: Camión CAT 797F
		Sub. Sistema: Sistema eléctrico
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Proveer la alimentación al equipo para controlar componentes electrónicos, iluminación y el arranque del equipo.	A. Motor no arranca
		B. Sistema de luces halógenas no enciende
		c. Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico
		D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor
		E. El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52: Fallas funcionales sistema estructural

		Sistema: Camión CAT 797F
Hoja de trabajo de información RCM II		Sub. Sistema: Sistema estructural
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Proveer la alimentación al equipo para controlar componentes electrónicos, iluminación y el arranque del equipo.	A. Grietas en el Chasis
		B. Grietas en Tanque de Combustible
		C. Tanque de Combustible Suelto
		D. Guardas de Motor Seltas
		E. Capo Suelto / Agrietado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53: Fallas funcionales sistema de cabina

Hoja de trabajo de información RCM II		Sistema: Camión CAT 797F
		Sub. Sistema: Sistema de cabina
Función		Falla funcional (pérdida de función)
1	Proveer la alimentación al equipo para controlar componentes electrónicos, iluminación y el arranque del equipo.	A. Aire acondicionado y calentador con control automático de temperatura des calibrado
		B. Asiento (tela) con suspensión neumática Confort Cat inoperativos
		C. Calentador y des congelador inoperativo
		D. Cabina insonorizada y presurizada con Estructura de Protección en Caso de Vuelcos con filtraciones
		E. Filtros de aire de cabina saturados

Fuente: Elaboración propia

5.2 Identificación de modos de falla

Tabla 54: Modos de falla de tren de fuerza (motor)

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión CAT 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C175 ACERT	Motor no arranca	No llega combustible al motor.	Admisión de aire mal.	Admisión dañada
				Bomba de trasferencia averiada.	Falta de aire en el motor.	Filtro de aire suturado
				Motor de sincronizado.	Piñón de arrastre de bomba de inyección flojo	Motor fuera de punto
				Bomba de inyección averiada.	Falta de calibración de inyectores	Inyector dañado
				Baja Presión del Aceite del Motor	Cojinetes de bancada gastados.	Cigüeñal dañado

				Fallo en inyectores	Falla en inyector	Inyector averiado
				Fallo en reglaje de válvulas.	Falla en inyector	Mal ajuste
				Cable acelerador averiado.	Falla en acelerador	Cable roto
			El Motor se Apaga a Bajas Revoluciones	Combustible de mala calidad	Falla en filtros saturados	Filtros saturados
				Ralentiza demasiado bajo	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado
				Baja presión de bomba de transferencia	Presión baja	Bomba de transferencia dañada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55: Modos de falla sistema de dirección y frenos

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión CAT 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Equipo Frenado	Equipo No frena por Varillaje Suelto de Frenos	Ajuste incorrecto
					Equipo No frena por Válvula de control y dirección y frenos atascada.	Fuga interna
				Equipo Frenado / Equipo No frena por Embragues de Dirección y frenos con fuga interna	Ajuste incorrecto	Ajuste incorrecto
		Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto

				Equipo no gira a la derecha o a la izquierda por	Válvula de control y dirección y frenos atascada	Fuga interna
				Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Embragues de Dirección con fuga interna	Alto desgaste
				Equipo no gira en ninguna dirección	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto
				Equipo no gira en ninguna dirección	Baja presión de aceite en la válvula de dirección y frenos	Fuga interna
				Equipo no gira en ninguna dirección	La válvula de prioridad no maneja la presión correcta	Ajuste incorrecto

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56: Modos de falla sistema de enfriamiento

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión CAT 797F	Falla de Sistema de Enfriamiento	Falla de Radiador	Falla en el Radiador	Fuga por Mangueras de Refrigerante por líneas de refrigerante por roce	Instalación incorrecta de mangueras	-
				Fuga de Refrigerante por sello de Modulo	Instalación incorrecta de sello	-
				Fuga de Refrigerante por Modulo por golpe	Instalación incorrecta de modulo	-
				Radiador Obstruido Externamente por suciedad	-	-
				Radiador Obstruido Internamente por contaminación	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57: Modos de falla sistema hidráulico

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión CAT 797F	Falla de sist. Hidráulico	Bombas hidráulicas	Bombas hidráulicas inoperativas	No levanta los Implementos/Implementos Lentos Varillaje Suelto de palanca de levante	No levanta los Implementos/Implementos Lentos Baja Presión de Bomba por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración
				No levanta los Implementos/Implementos Lentos Baja Presión de Bomba por desgaste interno	No levanta los Implementos/Implementos Lentos por Tanque Hidráulico sin aceite por f fuga	Fuga de aceite
				No levanta los Implementos/Implementos Lentos por eje de la bomba / daño del drive del motor	No levanta los Implementos/Implementos Lentos por Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico

		Mangueras hidráulicas	Mangueras hidráulicas rotas	Implementos se caen Varillaje Suelto de palanca de levante	Implementos se caen Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico
				Implementos se caen Fuga Interna en cilindros	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Bajo Nivel de Aceite Tanque Hidráulico	Contaminación del Aceite de Hidráulico
				Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidráulico	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de Alivio calibrada a presión muy baja o alta	Falta de calibración
				Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Restricción en el sistema hidráulico	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Aceite Degradado	Falta de calibración
		Sistema de arranque	Sistema de arranque averiado	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Enfriador de aceite obstruido	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de bypass no funciona correctamente	Falta de calibración

				Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Baja Presión de Bomba por desgaste interno	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico
				Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Ventilador no gira o con baja velocidad	Fuga por líneas de Hidráulicas por roce - instalación incorrecta	Falta de calibración
		Solenoides	Solenoides dañados	Fuga Hidráulica por Tubos de Hidráulicos por roce - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por tapa o carcasa de Filtros de Hidráulico- instalación incorrecta	Falta de calibración
				Fuga Hidráulica por Screen de Hidráulico - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por Bomba de Fan- instalación incorrecta	Falta de calibración
				Fuga Hidráulica por Bomba de Implementos- instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por Tanque de Hidráulico por grietas - instalación incorrecta	Falta de calibración

				Fuga Hidráulica por Enfriador de Hidráulico- instalación incorrecta	Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de Bomba de fan por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración
				Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de Bomba de fan por desgaste interno	Ventilador no gira o con baja velocidad Tanque Hidráulico sin aceite por f fuga	Fuga de aceite
		Sensores	Sensores dañados	Ventilador no gira o con baja velocidad partió el eje de la bomba / daño del drive del motor	Ventilador no gira o con baja velocidad Válvula solenoide y compensadoras de la fan atascada o con f fuga interna	Fuga de aceite
				Ventilador no gira o con baja velocidad Motor del fan con desgaste interno	Ventilador no gira o con baja velocidad partió tonillos de sujeción del ventilador / Instalación incorrecta	Falta de calibración
				Aire en el sistema hidráulico	Ruido en la Bomba con desgaste interno	Desgaste

				<p>Ruido en la Bomba</p> <p>Implementos no inclinan</p> <p>Problema Mecánico Fuga</p> <p>Interna en Válvula dual</p>	<p>Ruido en la Bomba</p> <p>Implementos no inclinan</p> <p>Problema Mecánico Fuga</p> <p>interna en cilindro de</p> <p>inclinación</p>	<p>Fuga de aceite</p>
				<p>Análisis de Aceite Critico de</p> <p>Hidráulico SOS por Silicio,</p> <p>entrada de tierra al Sistema</p> <p>Hidráulico - Instalación</p> <p>Incorrecta</p>	<p>Análisis de Aceite Critico de</p> <p>Hidráulico SOS por Agua,</p> <p>entrada de agua al Sistema</p> <p>Hidráulico- Instalación</p> <p>Incorrecta</p>	<p>Contaminación</p> <p>del Aceite de</p> <p>Hidráulico</p>
				<p>Análisis de Aceite Critico de</p> <p>Hidráulico SOS por Sodio,</p> <p>entrada de Refrigerante al</p> <p>Sistema Hidráulico</p>	<p>Análisis de Aceite Critico de</p> <p>Hidráulico SOS por Cobre,</p> <p>Hierro, Aluminio Bombas con</p> <p>desgaste interno</p>	<p>Contaminación</p> <p>del Aceite de</p> <p>Hidráulico con</p> <p>refrigerante</p> <p>Enfriador de</p> <p>Hidráulico Roto</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58: Modos de falla sistema eléctrico

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión CAT 797F	Falla Sistema Eléctrico	Motor no arranca	Motor no arranca	Bajo Voltaje El Voltaje de la Batería en más de 32 voltios DC /	Admisión de aire mal.	Admisión dañada
				Alternador no regula	Falta de aire en el motor.	Filtro de aire suturado
				Aparece alarma de alto voltaje en el tablero, el operador para el equipo	Piñón de arrastre de bomba de inyección flojo	Motor fuera de punto
				Alto Voltaje El Voltaje de Las Baterías es	Falta de calibración de inyectores	Inyector dañado

				menor que 9 Voltios DC/		
				Alternador no carga / Baterías no cargan	Cojinetes de bancada gastados.	Cigüeñal dañado
				Aparece alarma de bajo voltaje en el	Falla en inyector	Inyector averiado
				tablero, el operador para el equipo	Falla en inyector	Mal ajuste
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Falla en Inyector	Falla en acelerador	Cable roto
		Sistema de luces halógenas no enciende	Sistema de luces halógenas no enciende	/Solenoide del Inyector/ Arnés del Inyector abierto o en corto	Falla en filtros saturados	Filtros saturados

				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Switch de aceleración no f funciona / Arnés del Switch abierto o en corto	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado
		Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico	Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico	Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de posición del desacelerador no f funciona / Arnés del Sensor abierto o en corto	Presión baja	Bomba de transferencia dañada

				<p>Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Presión de salida del Turbo cargador no f funciona /</p>	<p>Arnés del Sensor abierto</p>	<p>en corto</p>
				<p>Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Presión Atmosférica no funciona / Arnés del Sensor abierto o en corto</p>	<p>Arnés del Sensor abierto</p>	<p>en corto</p>

				Baja Potencia por Problemas Eléctrico Sensor de Velocidad y tiempo no f funciona / Arnés del Sensor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos, harnes de Motor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Falla	Arnés del Sensor abierto	en corto

				Interna del EMC		
		D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor	D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor	Motor no gira por problemas Eléctricos Baterías descargadas		
				Motor no gira por problemas Eléctricos Motores de Arranque Abierto en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Motor no gira por problemas Eléctricos Arnés de Motor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto

				Motor no gira por problemas Eléctricos Arnés de Circuito de Arranque Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Motor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Motor Gira, pero no Arranca por	Arnés del Sensor abierto	en corto

				Problemas Eléctricos Falla en		
				Inyector /Solenoides del Inyector/ Arnés del Inyector abierto o en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos Falla Interna del EMC	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Motor Gira, pero no Arranca por	Arnés del Sensor abierto	en corto

				Problemas Eléctricos		
				Configuración errónea del ECM	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Problemas Eléctricos Sensor de Temperatura de dañado	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto

				Problemas Eléctricos Arnés de Sensor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Problemas Eléctricos Indicador de Temperatura Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Indicador de Nivel de	Arnés del Sensor abierto	en corto

				combustible Abierto en corto		
				Aparece la alarma de Indicador de Nivel de Combustible, el operador para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Luces no Funcionan Arnés de Luces Abierto o en Corto / Daño en Lámparas / Daño en Switch	Arnés del Sensor abierto	en corto

				En turno nocturno el operador pierde visibilidad por la falta de luces y para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Corto en la Fusilera	Arnés del Sensor abierto	en corto
				El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero, para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto
				Pito No funciona Arnés de Pito Abierto o en Corto /	Arnés del Sensor abierto	en corto

				Daño en Pito / Daño en Switch		
		El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero	El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM
				Alarma de Retocesno no Funciona Arnés de Alarma Abierto o en	Conector abierto	Conector abierto
				Corto / Daño en Alarma / Daño en Switch	Conector abierto	Conector abierto

				El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	Conector abierto	Conector abierto
				Luces de Tablero - Alarmas No f funcionan /Corto en el tablero	Conector abierto	Conector abierto
				Arnés de Tablero Abierto o en Corto / Daño en Luces de tablero	Conector abierto	Conector abierto
				El operador no observa ninguna señal de alarma en el	Conector abierto	Conector abierto

				tablero, para el equipo		
				Alarma de 5 voltios Arnés de Motor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Conector abierto	Conector abierto
				El Motor no trabaja correctamente el operador para el equipo	Conector abierto	Conector abierto
				Problema de Inclinación de la hoja topadora Arnés de Careta	Conector abierto	Conector abierto

				Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Conector abierto	Conector abierto
				El operador no puede inclinar la hoja topadora y para el quipo	Conector abierto	Conector abierto
				Plumillas limpia vidrios no Funcionan Arnés de Motores	Conector abierto	Conector abierto

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59: Modos de falla sistema estructural

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Chasis	Grietas en el Chasis	Grietas en el Chasis	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
		Tanque de combustible	Grietas en Tanque de Combustible	Grietas en el Fender	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
		Guardas	Tanque de Combustible Suelto	Grietas en Tanque de Combustible	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
				Tanque de Combustible Suelto	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
		Guardas de Motor Seltas	Tanque de Hidráulico Suelto	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	
			Pecheras sueltas - Instalación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	

				El operador debe parar el equipo, si no lo hace puede causar daños graves al motor o al convertidor	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
		Capo	Capo Suelto / Agrietado	Guardas de Motor Seltas - Instalación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
				Tapas de baterías Seltas	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
				Juego en alojamientos del Chasis / lubricación incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
				Juego en Alojamiento de Careta/ Yokes de Cilindros / Lubricación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos
				Capo Suelto / Agrietado	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60: Modos de falla sistema de cabina

Nivel de detalle						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla Camión 797F	Falla de sistema de cabina	Aire acondicionado y calentador	Aire acondicionado y calentador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor
			Control automático de temperatura	Control de temperatura	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor
		Asiento (tela) con suspensión neumática Confort Cat	Asiento (tela) con suspensión rota neumática Confort Cat	Asiento averiado	Mala calibración de asiento	Mala calibración de asiento
		Calentador y des congelador	Calentador y des congelador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor
		Filtros de aire de cabinXa	Filtros de aire de cabina	Filtro de aire principal	Filtros saturados	Filtros saturados

Fuente: Elaboración propia

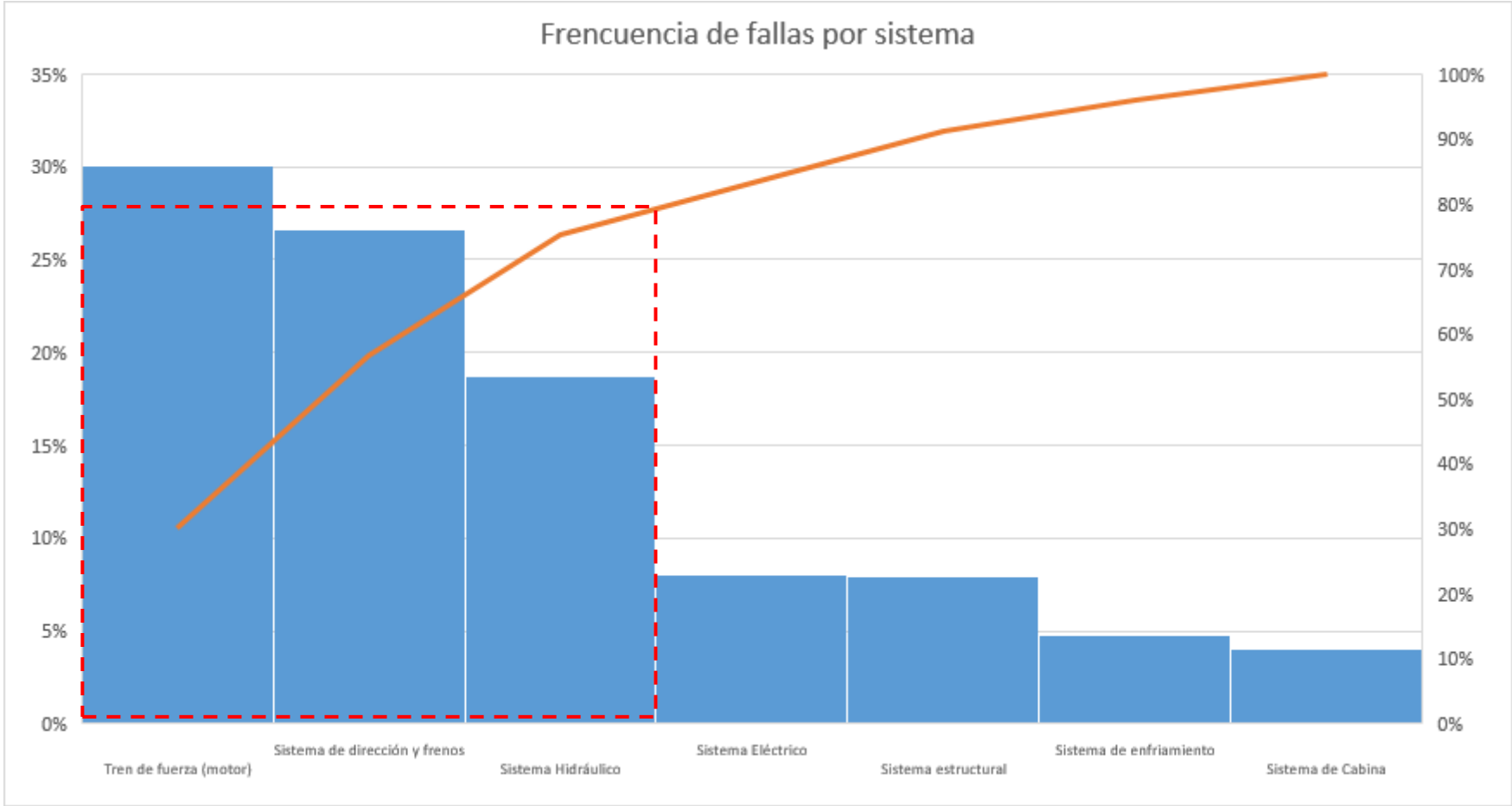
1. FMEA Frecuencia de falla por sistema por mes

Tabla 61: Frecuencia de falla por sistema

Sistema	Frecuencia (veces/mes)	Costo de parada	TOTAL	Frecuencia	Acumulado
Tren de fuerza (motor)	24	USD 1,102.27	USD 26,454.55	30%	30%
Sistema de dirección y frenos	18	USD 1,301.78	USD 23,432.00	27%	57%
Sistema Hidráulico	15	USD 1,098.71	USD 16,480.71	19%	75%
Sistema Eléctrico	22	USD 320.38	USD 7,048.40	8%	83%
Sistema estructural	6	USD 1,162.75	USD 6,976.50	8%	91%
Sistema de enfriamiento	4	USD 1,043.00	USD 4,172.00	5%	96%
Sistema de Cabina	7	USD 470.75	USD 3,295.25	4%	100%
			USD 91,418.00	100%	

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19: Frecuencia de falla por sistema



Fuente: Elaboración propia

Tabla 62: Criticidad de los modos de falla FMEA

Nivel de detalle							FMEA			
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7	F (mes)	Costo de Parada	TOTAL	CRITICIDAD
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	No llega combustible al motor.	Admisión de aire mal.	Admisión dañada	4	USD1,345.00	USD5,380.00	5.92%
				Bomba de transferencia averiada.	Falta de aire en el motor.	Filtro de aire suturado	1	USD1,051.00	USD1,051.00	1.16%
				Motor de sincronizado.	Piñón de arrastre de bomba de inyección flojo	Motor fuera de punto	1	USD1,093.00	USD1,093.00	1.20%
				Bomba de inyección averiada.	Falta de calibración de inyectores	Inyector dañado	2	USD1,024.00	USD2,048.00	2.25%
				Baja Presión del Aceite del Motor	Cojinetes de bancada gastados.	Cigüeñal dañado	3	USD 993.00	USD2,979.00	3.28%
				Fallo en inyectores	Falla en inyector	Inyector averiado	4	USD 993.00	USD3,972.00	4.37%
				Fallo en reglaje de válvulas.	Falla en inyector	Mal ajuste	1	USD1,058.00	USD1,058.00	1.16%
				Cable acelerador averiado.	Falla en acelerador	Cable roto	2	USD 779.00	USD1,558.00	1.71%
			El Motor se Apaga a Bajas Revoluciones	Combustible de mala calidad	Falla en filtros saturados	Filtros saturados	2	USD1,613.00	USD3,226.00	3.55%
	Ralentiza demasiado bajo	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado	2	USD 950.00	USD1,900.00	2.09%			

				Baja presión de bomba de transferencia	Presión baja	Bomba de transferencia dañada	2	USD1,226.0 0	USD2,452.0 0	2.70%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Equipo Frenado	Equipo No frena por Varillaje Suelto de Frenos	Ajuste incorrecto	1	USD1,335.0 0	USD1,335.0 0	1.47%
					Equipo No frena por Válvula de control y dirección y frenos atascada.	Fuga interna	2	USD1,333.0 0	USD2,666.0 0	2.93%
				Equipo Frenado / Equipo No frena por Embragues de Dirección y frenos con fuga interna	Ajuste incorrecto	Ajuste incorrecto	3	USD1,132.0 0	USD3,396.0 0	3.74%
				Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto	4	USD1,479.0 0	USD5,916.0 0	6.51%
		Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira a la derecha o a la izquierda por	Válvula de control y dirección y frenos atascada	Fuga interna	3	USD1,155.0 0	USD3,465.0 0	3.81%
				Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Embragues de Dirección con fuga interna	Alto desgaste	2	USD1,380.0 0	USD2,760.0 0	3.04%
				Equipo no gira en ninguna dirección	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto	2	USD1,409.0 0	USD2,818.0 0	3.10%
				Equipo no gira en ninguna dirección	Baja presión de aceite en la válvula de dirección y frenos	Fuga interna	1	USD1,199.0 0	USD1,199.0 0	1.32%

				Equipo no gira en ninguna dirección	La válvula de prioridad no maneja la presión correcta	Ajuste incorrecto	1	USD1,294.00	USD1,294.00	1.42%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Enfriamiento	Falla de Radiador	Falla en el Radiador	Fuga por Mangueras de Refrigerante por líneas de refrigerante por roce	Instalación incorrecta de mangueras	-	1	USD 815.00	USD 815.00	0.90%
				Fuga de Refrigerante por sello de Modulo	Instalación incorrecta de sello	-	1	USD1,038.00	USD1,038.00	1.14%
				Fuga de Refrigerante por Modulo por golpe	Instalación incorrecta de modulo	-	1	USD 931.00	USD 931.00	1.02%
				Radiador Obstruido Externamente por suciedad	-	-	1	USD1,249.00	USD1,249.00	1.37%
				Radiador Obstruido Internamente por contaminación	-	-	0	USD1,182.00	USD -	0.00%
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Bombas hidráulicas	Bombas hidráulicas inoperativas	No levanta los Implementos/Implementos Lentos Varillaje Suelto de palanca de levante	No levanta los Implementos/Implementos Lentos Baja Presión de Bomba por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración	2	USD 945.00	USD1,890.00	2.08%
				No levanta los Implementos/Implementos Lentos Baja Presión de Bomba por desgaste interno	No levanta los Implementos/Implementos Lentos por Tanque Hidráulico sin aceite por f fuga	Fuga de aceite	0	USD 747.00	USD -	0.00%

		No levanta los Implementos/Implementos Lentos por Partió el eje de la bomba / daño del drive del motor	No levanta los Implementos/Implementos Lentos por Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0	USD 798.00	USD -	0.00%
Mangueras hidráulicas	Mangueras hidráulicas rotas	Implementos se caen Varillaje Suelto de palanca de levante	Implementos se caen Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico	1	USD1,370.00	USD1,370.00	1.51%
		Implementos se caen Fuga Interna en cilindros	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Bajo Nivel de Aceite Tanque Hidráulico	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0	USD1,426.00	USD -	0.00%
		Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidráulico	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de Alivio calibrada a presión muy baja o alta	Falta de calibración	2	USD 978.00	USD1,956.00	2.15%
		Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Restricción en el sistema hidráulico	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Aceite Degradado	Falta de calibración	1	USD1,016.00	USD1,016.00	1.12%
		Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Enfriador de aceite obstruido	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de bypass no funciona correctamente	Falta de calibración	1	USD 779.00	USD 779.00	0.86%
Sistema de arranque	Sistema de arranque averiado	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Enfriador de aceite obstruido	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de bypass no funciona correctamente	Falta de calibración	1	USD 779.00	USD 779.00	0.86%

			Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Baja Presión de Bomba por desgaste interno	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0	USD1,090.00	USD -	0.00%
			Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Ventilador no gira o con baja velocidad	Fuga por líneas de Hidráulicas por roce - instalación incorrecta	Falta de calibración	1	USD1,017.00	USD1,017.00	1.12%
	Solenoides	Solenoides dañados	Fuga Hidráulica por Tubos de Hidráulicos por roce - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por tapa o carcasa de Filtros de Hidráulico- instalación incorrecta	Falta de calibración	1	USD1,322.00	USD1,322.00	1.45%
			Fuga Hidráulica por Screen de Hidráulico - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por Bomba de Fan- instalación incorrecta	Falta de calibración	1	USD 881.00	USD 881.00	0.97%
			Fuga Hidráulica por Bomba de Implementos- instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por Tanque de Hidráulico por grietas - instalación incorrecta	Falta de calibración	1	USD 906.00	USD 906.00	1.00%
			Fuga Hidráulica por Enfriador de Hidráulico- instalación incorrecta	Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de Bomba de fan por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración	1	USD1,195.00	USD1,195.00	1.31%
			Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de	Ventilador no gira o con baja velocidad	Fuga de aceite	0	USD1,405.00	USD -	0.00%

			Bomba de fan por desgaste interno	Tanque Hidráulico sin aceite por fuga					
			Ventilador no gira o con baja velocidad Partió el eje de la bomba / daño del drive del motor	Ventilador no gira o con baja velocidad Válvula solenoide y compensadoras de la fan atascada o con fuga interna	Fuga de aceite	1	USD1,347.00	USD1,347.00	1.48%
			Ventilador no gira o con baja velocidad Motor del fan con desgaste interno	Ventilador no gira o con baja velocidad Partió tonillos de sujeción del ventilador / Instalación incorrecta	Falta de calibración	0	USD1,239.00	USD -	0.00%
			Aire en el sistema hidráulico	Ruido en la Bomba con desgaste interno	Desgaste	0	USD1,171.00	USD -	0.00%
			Ruido en la Bomba Implementos no inclinan Problema Mecánico Fuga Interna en Válvula dual	Ruido en la Bomba Implementos no inclinan Problema Mecánico Fuga interna en cilindro de inclinación	Fuga de aceite	0	USD 712.00	USD -	0.00%
			Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Silicio, entrada de tierra al Sistema Hidráulico - Instalación Incorrecta	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Agua, entrada de agua al Sistema Hidráulico- Instalación Incorrecta	Contaminación del Aceite de Hidráulico	1	USD1,305.00	USD1,305.00	1.44%
		Sensores	Sensores dañados						

				Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Sodio, entrada de Refrigerante al Sistema Hidráulico	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Cobre, Hierro, Aluminio Bombas con desgaste interno	Contaminación del Aceite de Hidráulico con enfriador de Hidráulico Roto	1	USD1,424.00	USD1,424.00	1.57%
Falla Camión 797F	Falla Sistema eléctrico	Motor no arranca	Motor no arranca	Bajo Voltaje El Voltaje de la Batería en más de 32 voltios DC /	Admisión de aire mal.	Admisión dañada	0	USD 303.00	USD -	0.00%
				Alternador no regula	Falta de aire en el motor.	Filtro de aire suturado	0	USD 432.00	USD -	0.00%
				Aparece alarma de alto voltaje en el tablero, el operador para el equipo		Motor fuera de punto	1	USD 391.00	USD 391.00	0.43%
					Piñón de arrastre de bomba de inyección flojo		1	USD 413.00	USD 413.00	0.45%
				Alto Voltaje El Voltaje de Las Baterías es menor que 9 Voltios DC/	Falta de calibración de inyectores	Inyector dañado	0	USD 215.00	USD -	0.00%
				Alternador no carga / Baterías no cargan	Cojinetes de bancada gastados.	Cigüeñal dañado	0	USD 473.00	USD -	0.00%
				Aparece alarma de bajo voltaje en el	Falla en inyector	Inyector averiado	0	USD 431.00	USD -	0.00%
				tablero, el operador para el equipo	Falla en inyector	Mal ajuste	1	USD 226.00	USD 226.00	0.25%
Baja Potencia por Problemas Eléctricos Falla en Inyector	Falla en acelerador	Cable roto	1	USD 358.00	USD 358.00	0.39%				

		Sistema de luces halógenas no enciende	Sistema de luces halógenas no enciende	/Solenoides del Inyector/ Arnés del Inyector abierto o en corto	Falla en filtros saturados	Filtros saturados	0	USD 305.00	USD -	0.00%
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Switch de aceleración no funciona / Arnés del Switch abierto o en corto	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado	1	USD 315.00	USD 315.00	0.35%
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de posición del desacelerador no funciona / Arnés del Sensor abierto o en corto	Presión baja	Bomba de transferencia dañada	1	USD 265.00	USD 265.00	0.29%
		Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico	Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico	Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Presión de salida del Turbo cargador no funciona /	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 429.00	USD -	0.00%
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Presión Atmosférica no funciona / Arnés del Sensor abierto o en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 206.00	USD 206.00	0.23%
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Velocidad y tiempo no funciona / Arnés del Sensor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 315.00	USD -	0.00%

			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Arnés de Motor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 280.00	USD -	0.00%
			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Falla Interna del EMC	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 330.00	USD 330.00	0.36%
			Motor no gira por problemas Eléctricos Baterías descargadas			0	USD 269.00	USD -	0.00%
			Motor no gira por problemas Eléctricos Motores de Arranque Abierto en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 443.00	USD 443.00	0.49%
			Motor no gira por problemas Eléctricos Arnés de Motor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 146.00	USD 146.00	0.16%
			Motor no gira por problemas Eléctricos Arnés de Circuito de Arranque Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 156.00	USD -	0.00%
			Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 230.00	USD -	0.00%
			Motor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 269.00	USD -	0.00%
			Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos Falla en	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 316.00	USD -	0.00%
	D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor	D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor							

			Inyector /Solenoides del Inyector/ Arnés del Inyector abierto o en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 150.00	USD -	0.00%
			Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos Falla Interna del EMC	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 250.00	USD -	0.00%
			Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 376.00	USD -	0.00%
			Configuración errónea del ECM	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 330.00	USD 330.00	0.36%
			Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 462.00	USD -	0.00%
			Problemas Eléctricos Sensor de Temperatura de dañado	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 437.00	USD -	0.00%
			Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 273.00	USD -	0.00%
			Problemas Eléctricos Arnés de Sensor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 388.00	USD 388.00	0.43%
			Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 412.00	USD -	0.00%
			Problemas Eléctricos Indicador de Temperatura Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 465.00	USD -	0.00%
			Indicador de Nivel de combustible Abierto en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 147.00	USD -	0.00%

			Aparece la alarma de Indicador de Nivel de Combustible, el operador para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 260.00	USD 260.00	0.29%
			Luces no Funcionan Arnés de Luces Abierto o en Corto / Daño en Lámparas / Daño en Switch	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 289.00	USD 289.00	0.32%
			En turno nocturno el operador pierde visibilidad por la falta de luces y para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 365.00	USD 365.00	0.40%
			Corto en la Fusilera	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 381.00	USD -	0.00%
			El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero, para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	USD 456.00	USD -	0.00%
			Pito No funciona Arnés de Pito Abierto o en Corto / Daño en Pito / Daño en Switch	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	USD 305.00	USD 305.00	0.34%
	El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero	El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	0	USD 184.00	USD -	0.00%

			Alarma de Retroceso no Funciona Arnés de Alarma Abierto o en	Conector abierto	Conector abierto	0	USD 199.00	USD -	0.00%	
			Corto / Daño en Alarma / Daño en Switch	Conector abierto	Conector abierto	1	USD 275.00	USD 275.00	0.30%	
			El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	Conector abierto	Conector abierto	1	USD 342.00	USD 342.00	0.38%	
			Luces de Tablero - Alarmas No funcionan /Corto en el tablero	Conector abierto	Conector abierto	0	USD 408.00	USD -	0.00%	
			Alarma de 5 voltios Arnés de Motor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Conector abierto	Conector abierto	1	USD 463.00	USD 463.00	0.51%	
			Problema de Inclinación de la hoja topadora Arnés de Careta	Conector abierto	Conector abierto	1	USD 153.00	USD 153.00	0.17%	
			Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Conector abierto	Conector abierto	0	USD 443.00	USD -	0.00%	
			El operador no puede inclinar la hoja topadora y para el equipo	Conector abierto	Conector abierto	1	USD 344.00	USD 344.00	0.38%	
			Plumillas limpia vidrios no Funcionan Arnés de Motores	Conector abierto	Conector abierto	1	USD 369.00	USD 369.00	0.41%	
			limpiavidrios Abierto o en Corto / Daño en Motores / Daño en Switch	Conector abierto	Conector abierto	0	USD 336.00	USD -	0.00%	
	Sistema estructural	Chasis	Grietas en el Chasis	Grietas en el Chasis	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	USD1,394.00	USD1,394.00	1.53%

Falla Camión 797F		Tanque de combustible	Grietas en Tanque de Combustible	Grietas en el Fender	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	USD 610.00	USD 610.00	0.67%
		Guardas	Tanque de Combustible Suelto	Grietas en Tanque de Combustible	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	USD1,024.00	USD1,024.00	1.13%
			Guardas de Motor Seltas	Tanque de Hidráulico Suelto	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	USD1,861.00	USD -	0.00%
				Pecheras sueltas - Instalación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	USD1,270.00	USD1,270.00	1.40%
				El operador debe parar el equipo, si no lo hace puede causar daños graves al motor o al convertidor	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	USD 438.00	USD -	0.00%
		Capo	Capo Suelto / Agrietado	Guardas de Motor Seltas - Instalación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	USD1,036.00	USD -	0.00%
				Tapas de baterías Seltas	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	USD1,723.00	USD1,723.00	1.90%
				Juego en alojamientos del Chasis / lubricación incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	USD 813.00	USD 813.00	0.89%
				Juego en Alojamiento de Careta/ Yokes de Cilindros / Lubricación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	USD1,078.00	USD -	0.00%
		Falla Camión 797F	Falla de sistema de cabina	Aire acondicionado	Aire acondicionado y calentador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	2	USD 955.00

		o y calentador	Control automático de temperatura	Control de temperatura	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	1	USD 319.00	USD 319.00	0.35%
		Asiento (tela) con suspensión	Asiento (tela) con suspensión rota	Asiento averiado	Mala calibración de asiento	Mala calibración de asiento	2	USD 497.00	USD 994.00	1.09%
		Calentador y des congelador	Calentador y des congelador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	2	USD 586.00	USD1,172.00	1.29%
		Cabina insonorizada y presurizada con	Cabina insonorizada y presurizada con	Protección de cabina	Ejes en mal estado	Ejes en mal estado	0	USD 367.00	USD -	0.00%
		Estructura de Protección en Caso de Vuelcos	Estructura de Protección en Caso de Vuelcos				1	USD 232.00	USD 232.00	0.26%
		Filtros de aire de cabina	Filtros de aire de cabina	Filtro de aire principal	Filtros saturados	Filtros saturados	0	USD 250.00	USD -	0.00%

Fuente: Elaboración propia.

Esta criticidad por modo de falla permitirá definir en qué modos de falla analizaremos y estudiaremos en nuestro árbol de causa raíz.

5.3 FMEA modificado

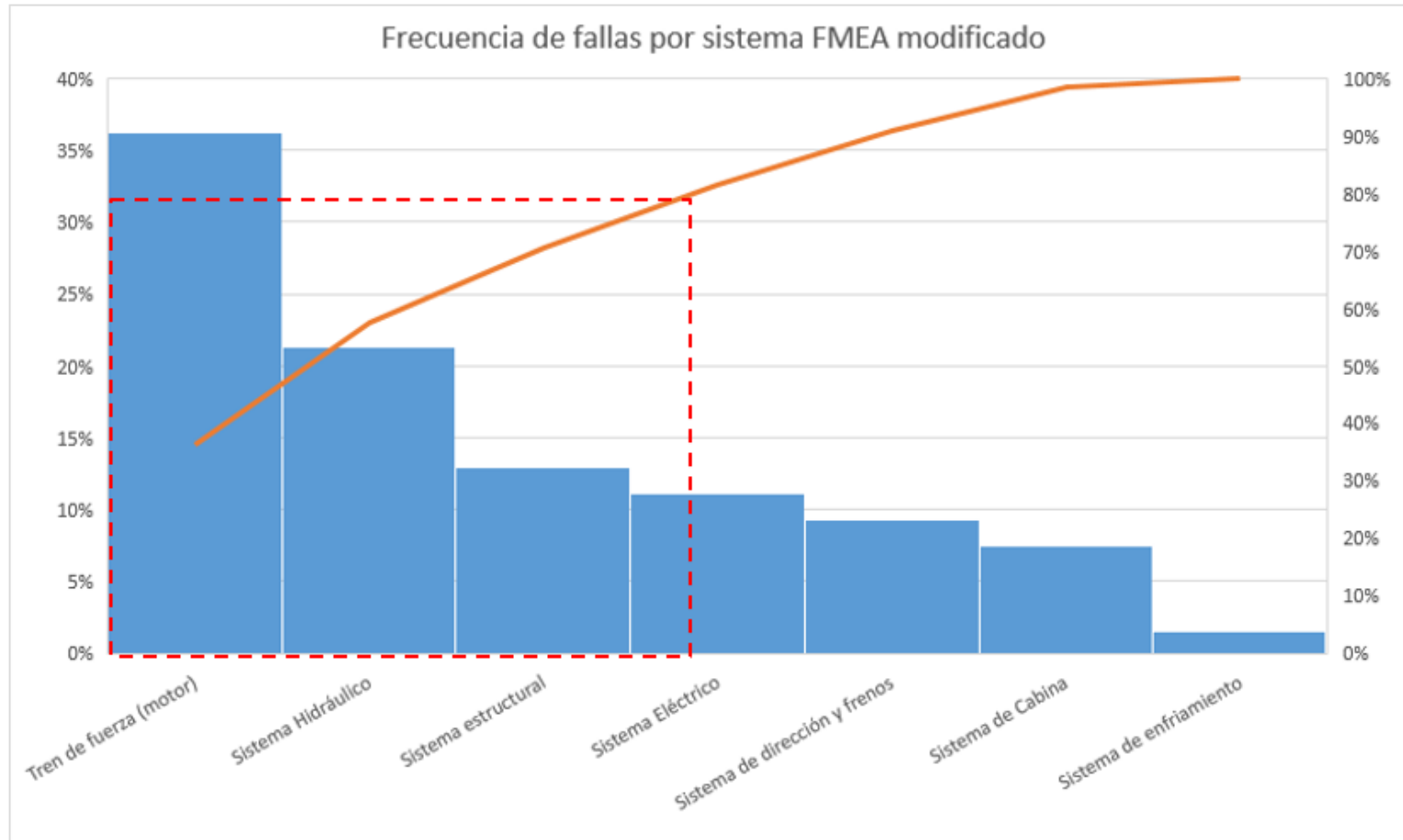
Tabla 63: FMEA Modificado

Sistema	Frecuencia (veces/mes)	Frecuencia (veces/año)	IMPACTO			TOTAL	Frecuencia	Acumulado
			Mano de obra USD	Repuesto USD	Costo de parada USD			
Tren de fuerza (motor)	24	288	USD 50.00	USD 3,600.00	USD 2,030.00	USD 1,635,840.00	36%	36%
Sistema Hidráulico	15	180	USD 50.00	USD 1,190.00	USD 4,100.00	USD 961,200.00	21%	58%
Sistema estructural	6	72	USD100.00	USD 7,200.00	USD 980.00	USD 581,760.00	13%	70%

Sistema Eléctrico	22	264	USD 50.00	USD800.00	USD 1,050.00	USD 501,600.00	11%	82%
Sistema de dirección y frenos	18	216	USD 50.00	USD970.00	USD 930.00	USD 421,200.00	9%	91%
Sistema de Cabina	7	84	USD 50.00	USD500.00	USD 3,500.00	USD 340,200.00	8%	98%
Sistema de enfriamiento	4	48	USD 50.00	USD800.00	USD 630.00	USD 71,040.00	2%	100%
TOTAL	96	1152				USD 3,440,064.00	100%	

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 20: FMEA Modificado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 64: Criticidad de los modos de falla FMEA Modificado

Nivel de detalle							FMEA MODIFICADO						
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7	F (mes)	F (año)	Mano de obra USD	Repuesto USD	Costo de Parada	TOTAL	CRITICIDAD AD
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	No llega aire al motor.	Admisión de aire mal.	Admisión dañada	4	48	USD 50.00	USD 1,345.00	USD 1,345.00	USD 239,760.00	6.97%
				Bomba de transferencia averiada.	Falta de aire en el motor.	Filtro de aire suturado	1	12	USD 50.00	USD 1,051.00	USD 1,051.00	USD 56,412.00	1.64%
				Motor de sincronizado.	Piñón de arrastre de bomba de inyección flojo	Motor fuera de punto	1	12	USD 50.00	USD 1,093.00	USD 1,093.00	USD 56,916.00	1.65%
				Bomba de inyección averiada.	Falta de calibración de inyectores	Inyector dañado	2	24	USD 50.00	USD 1,024.00	USD 1,024.00	USD 112,176.00	3.26%
				Baja Presión del Aceite del Motor	Cojinetes de bancada gastados.	Cigüeñal dañado	3	36	USD 50.00	USD 993.00	USD 993.00	USD 167,148.00	4.86%
				Fallo en inyectores	Falla en inyector	Inyector averiado	4	48	USD 50.00	USD 993.00	USD 993.00	USD 222,864.00	6.48%

				Fallo en reglaje de válvulas.	Falla en inyector	Mal ajuste	1	12	USD 50.00	USD 1,058.00	USD 1,058.00	USD 56,496.0 0	1.64%
				Cable acelerador averiado.	Falla en acelerador	Cable roto	2	24	USD 50.00	USD 779.00	USD 779.00	USD 106,296. 00	3.09%
			El Motor se Apaga a Bajas Revolucio nes	Combustible de mala calidad	Falla en filtros saturados	Filtros saturados	2	24	USD 50.00	USD 1,613.00	USD 1,613.00	USD 126,312. 00	3.67%
				Ralentiza demasiado bajo	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado	2	24	USD 50.00	USD 970.00	USD 950.00	USD 110,400. 00	3.21%
				Baja presión de bomba de transferencia	Presión baja	Bomba de transferencia dañada	2	24	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,226.00	USD 117,024. 00	3.40%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Equipo Frenado	Equipo No frena por Varillaje Suelto de Frenos	Ajuste incorrecto	1	12	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,335.00	USD 28,260.0 0	0.82%
					Equipo No frena por Válvula de control y dirección y frenos atascada.	Fuga interna	2	24	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,333.00	USD 56,472.0 0	1.64%

			Equipo Frenado / Equipo No frena por Embragues de Dirección y frenos con fuga interna	Ajuste incorrecto	Ajuste incorrecto	3	36	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,132.00	USD 77,472.00	2.25%	
		Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto	4	48	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,479.00	USD 119,952.00	3.49%
				Equipo no gira a la derecha o a la izquierda por	Válvula de control y dirección y frenos atascada	Fuga interna	3	36	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,155.00	USD 78,300.00	2.28%
				Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Embragues de Dirección con fuga interna	Alto desgaste	2	24	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,380.00	USD 57,600.00	1.67%
				Equipo no gira en ninguna dirección	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto	2	24	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,409.00	USD 58,296.00	1.69%
				Equipo no gira en ninguna dirección	Baja presión de aceite en la válvula de	Fuga interna	1	12	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,199.00	USD 26,628.00	0.77%

					dirección y frenos									
					Equipo no gira en ninguna dirección	La válvula de prioridad no maneja la presión correcta	Ajuste incorrecto	1	12	USD 50.00	USD 970.00	USD 1,294.00	USD 27,768.00	0.81%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Enfriamiento	Falla de Radiador	Falla en el Radiador		Fuga por Mangueras de Refrigerante por líneas de refrigerante por roce	Instalación incorrecta de mangueras	-	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 815.00	USD 19,980.00	0.58%
					Fuga de Refrigerante por sello de Modulo	Instalación incorrecta de sello	-	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 1,038.00	USD 22,656.00	0.66%
					Fuga de Refrigerante por Modulo por golpe	Instalación incorrecta de modulo	-	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 931.00	USD 21,372.00	0.62%
					Radiador Obstruido Externamente por suciedad	-	-	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 1,249.00	USD 25,188.00	0.73%
					Radiador Obstruido	-	-	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 1,182.00	USD -	0.00%

				Internamente por contaminación									
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Bombas hidráulicas	Bombas hidráulicas inoperativas	No levanta los Implementos/Lentos Varillaje Suelto de palanca de levante	No levanta los Implementos/Lentos Baja Presión de Bomba por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración	2	24	USD 50.00	USD 945.00	USD 945.00	USD 52,440.00	1.52%
				No levanta los Implementos/Lentos Baja Presión de Bomba por desgaste interno	No levanta los Implementos/Lentos por Tanque Hidráulico sin aceite por fuga	Fuga de aceite	0	0	USD 50.00	USD 747.00	USD 747.00	USD -	0.00%
				No levanta los Implementos/Lentos por	No levanta los Implementos/Implementos	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0	0	USD 50.00	USD 798.00	USD 798.00	USD -	0.00%

			Partió el eje de la bomba / daño del drive del motor	Lentos por Spool de Válvula de Levante atascada por partículas									
			Implementos se caen Varillaje Suelto de palanca de levante	Implementos se caen Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico	1	12	USD 50.00	USD 1,370.00	USD 1,370.00	USD 31,320.00		0.91%
	Mangueras hidráulicas	Mangueras hidráulicas rotas	Implementos se caen Fuga Interna en cilindros	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Bajo Nivel de Aceite Tanque Hidráulico	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0	0	USD 50.00	USD 1,426.00	USD 1,426.00	USD -		0.00%
			Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Sobre Nivel de	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de Alivio	Falta de calibración	2	24	USD 50.00	USD 978.00	USD 978.00	USD 53,232.00		1.55%

			Aceite Tanque Hidráulico	calibrada a presión muy baja o alta								
			Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Restricción en el sistema hidráulico	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Aceite Degradado	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 1,016.00	USD 1,016.00	USD 27,072.00	0.79%
	Sistema de arranque	Sistema de arranque averiado	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Enfriador de aceite obstruido	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de bypass no funciona correctamente	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 779.00	USD 779.00	USD 24,228.00	0.70%
			Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Baja Presión de Bomba por desgaste interno	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Spool de Válvula de Levante	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0	0	USD 50.00	USD 1,090.00	USD 1,090.00	USD -	0.00%

				atascada por partículas									
				Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Ventilador no gira o con baja velocidad	Fuga por líneas de Hidráulicas por roce - instalación incorrecta	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 1,017.00	USD 1,017.00	USD 27,084.00	0.79%
	Solenoides	Solenoides dañados		Fuga Hidráulica por Tubos de Hidráulicos por roce - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por tapa o carcasa de Filtros de Hidráulico- instalación incorrecta	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 1,322.00	USD 1,322.00	USD 30,744.00	0.89%
				Fuga Hidráulica por Screen de Hidráulico - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por Bomba de Fan- instalación incorrecta	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 881.00	USD 881.00	USD 25,452.00	0.74%
				Fuga Hidráulica por Bomba de Implementos-	Fuga Hidráulica por Tanque de Hidráulico	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 906.00	USD 906.00	USD 25,752.00	0.75%

			instalación incorrecta	por grietas - instalación incorrecta									
			Fuga Hidráulica por Enfriador de Hidráulico- instalación incorrecta	Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de Bomba de fan por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración	1	12	USD 50.00	USD 1,195.00	USD 1,195.00	USD 29,220.00	0	0.85%
			Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de Bomba de fan por desgaste interno	Ventilador no gira o con baja velocidad Tanque Hidráulico sin aceite por fuga	Fuga de aceite	0	0	USD 50.00	USD 1,405.00	USD 1,405.00	USD -		0.00%
	Sensores	Sensores dañados	Ventilador no gira o con baja velocidad Partió el eje de la bomba /	Ventilador no gira o con baja velocidad Válvula	Fuga de aceite	1	12	USD 50.00	USD 1,347.00	USD 1,347.00	USD 31,044.00	0	0.90%

				en Válvula dual	en cilindro de inclinación								
				Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Silicio, entrada de tierra al Sistema Hidráulico - Instalación Incorrecta	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Agua, entrada de agua al Sistema Hidráulico- Instalación Incorrecta	Contaminación del Aceite de Hidráulico	1	12	USD 50.00	USD 1,305.00	USD 1,305.00	USD 30,540.00	0.89%
				Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Sodio, entrada de Refrigerante al Sistema Hidráulico	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Cobre, Hierro, Aluminio Bombas con desgaste interno	Contaminación del Aceite de Hidráulico con refrigerante Enfriador de Hidráulico Roto	1	12	USD 50.00	USD 1,424.00	USD 1,424.00	USD 31,968.00	0.93%
Falla Camión 797F	Falla Sistema eléctrico	Motor no arranca	Motor no arranca	Bajo Voltaje El Voltaje de	Admisión de aire mal.	Admisión dañada	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 303.00	USD -	0.00%

			tablero, el operador para el equipo	Falla en inyector	Mal ajuste	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 226.00	USD 12,912.00	0.38%
			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Falla en Inyector	Falla en acelerador	Cable roto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 358.00	USD 14,496.00	0.42%
			/Solenoides del Inyector/ Arnés del Inyector abierto o en corto	Falla en filtros saturados	Filtros saturados	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 305.00	USD -	0.00%
			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Switch de aceleración no funciona / Arnés del Switch abierto o en corto	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 315.00	USD 13,980.00	0.41%
			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de	Presión baja	Bomba de transferencia dañada	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 265.00	USD 13,380.00	0.39%
			Alta Temperatura de Motor /	Alta Temperatura de Motor /								
			Sistema de luces halógenas no enciende	Sistema de luces halógenas no enciende								

		Transmisión / Hidráulico	Transmisión / Hidráulico	posición del desacelerador no funciona / Arnés del Sensor abierto o en corto									
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Presión de salida del Turbo cargador no funciona /	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 429.00	USD -	0.00%
				Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Presión Atmosférica no funciona / Arnés del Sensor abierto o en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 206.00	USD 12,672.00	0.37%

			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Sensor de Velocidad y tiempo no funciona / Arnés del Sensor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 315.00	USD -	0.00%
			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Arnés de Motor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 280.00	USD -	0.00%
			Baja Potencia por Problemas Eléctricos Falla Interna del EMC	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 330.00	USD 14,160.00	0.41%
	D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor	D. Problemas Eléctricos Arnés de Sensor	Motor no gira por problemas Eléctricos Baterías descargadas			0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 269.00	USD -	0.00%

			Motor no gira por problemas Eléctricos Motores de Arranque Abierto en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 443.00	USD 15,516.00	0.45%
			Motor no gira por problemas Eléctricos Arnés de Motor Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 146.00	USD 11,952.00	0.35%
			Motor no gira por problemas Eléctricos Arnés de Circuito de Arranque Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 156.00	USD -	0.00%
			Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 230.00	USD -	0.00%

				Motor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 269.00	USD -	0.00%
				Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos Falla en	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 316.00	USD -	0.00%
				Inyector /Solenoides del Inyector/ Arnés del Inyector abierto o en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 150.00	USD -	0.00%
				Motor Gira, pero no Arranca por Problemas Eléctricos Falla Interna del EMC	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 250.00	USD -	0.00%
				Motor Gira, pero no Arranca por	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 376.00	USD -	0.00%

			Alta Temperatura de Motor / Transmisión / Hidráulico por	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 412.00	USD -	0.00%
			Problemas Eléctricos Indicador de Temperatura Abierto o en Corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 465.00	USD -	0.00%
			Indicador de Nivel de combustible Abierto en corto	Arnés del Sensor abierto	en corto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 147.00	USD -	0.00%
			Aparece la alarma de Indicador de Nivel de Combustible, el operador para el equipo	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 260.00	USD 13,320.0 0	0.39%
			Luces no Funcionan Arnés de Luces Abierto	Arnés del Sensor abierto	en corto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 289.00	USD 13,668.0 0	0.40%

			en Pito / Daño en Switch									
El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero	El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 184.00	USD -	0.00%	
		Alarma de Retroceso no Funciona Arnés de Alarma Abierto o en	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 199.00	USD -	0.00%	
		Corto / Daño en Alarma / Daño en Switch	Conector abierto	Conector abierto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 275.00	USD 13,500.00	0.39%	
		El Operador No para el equipo, esto se revisa el PM	Conector abierto	Conector abierto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 342.00	USD 14,304.00	0.42%	
		Luces de Tablero - Alarmas No funcionan /Corto en el tablero	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 408.00	USD -	0.00%	

			Arnés de Tablero Abierto o en Corto / Daño en Luces de tablero	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 183.00	USD -	0.00%
			El operador no observa ninguna señal de alarma en el tablero, para el equipo	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 317.00	USD -	0.00%
			Alarma de 5 voltios Arnés de Motor Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Conector abierto	Conector abierto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 463.00	USD 15,756.00	0.46%
			El Motor no trabaja correctamente el operador para el equipo	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 343.00	USD -	0.00%
			Problema de Inclinación de la hoja	Conector abierto	Conector abierto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 153.00	USD 12,036.00	0.35%

				topadora Arnés de Caretas									
				Abierto o en Corto - Instalación Incorrecta	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 443.00	USD -	0.00%
				El operador no puede inclinar la hoja topadora y para el quipo	Conector abierto	Conector abierto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 344.00	USD 14,328.0 0	0.42%
				Plumillas limpia vidrios no Funcionan Arnés de Motores	Conector abierto	Conector abierto	1	12	USD 50.00	USD 800.00	USD 369.00	USD 14,628.0 0	0.43%
				limpiavidrios Abierto o en Corto / Daño en Motores / Daño en Switch	Conector abierto	Conector abierto	0	0	USD 50.00	USD 800.00	USD 336.00	USD -	0.00%
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Chasis	Grietas en el Chasis	Grietas en el Chasis	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	12	USD 100.00	USD 1,394.00	USD 1,394.00	USD 101,928. 00	2.96%

	Tanque de combustible	Grietas en Tanque de Combustible	Grietas en el Fender	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	12	USD 100.00	USD 610.00	USD 610.00	USD 92,520.00	2.69%
Guardas	Tanque de Combustible Suelto	Grietas en Tanque de Combustible	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	12	USD 100.00	USD 1,024.00	USD 1,024.00	USD 97,488.00	2.83%	
		Tanque de Combustible Suelto	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	0	USD 100.00	USD 1,802.00	USD 1,802.00	USD -	0.00%	
	Guardas de Motor Seltas	Tanque de Hidráulico Suelto	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	0	USD 100.00	USD 1,861.00	USD 1,861.00	USD -	0.00%	
		Pecheras sueltas - Instalación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	12	USD 100.00	USD 1,270.00	USD 1,270.00	USD 100,440.00	2.92%	
		El operador debe parar el equipo, si no lo hace puede causar daños graves al motoconvertidor	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	0	USD 100.00	USD 438.00	USD 438.00	USD -	0.00%	
	Capo		Guardas de Motor Seltas	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	0	USD 100.00	USD 1,036.00	USD 1,036.00	USD -	0.00%

				- Instalación Incorrecta									
			Capo Suelto / Agrietado	Tapas de baterías Seltas	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	12	USD 100.00	USD 1,723.00	USD 1,723.00	USD 105,876.00	3.08%
				Juego en alojamientos del Chasis /lubricación incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	1	12	USD 100.00	USD 813.00	USD 813.00	USD 94,956.00	2.76%
				Juego en Alojamiento de Careta/ Yokes de Cilindros / Lubricación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	0	USD 100.00	USD 1,078.00	USD 1,078.00	USD -	0.00%
				Capo Suelto / Agrietado	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	0	0	USD 100.00	USD 904.00	USD 904.00	USD -	0.00%
				Aire acondicionado y calentador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	2	24	USD 50.00	USD 500.00	USD 955.00	USD 36,120.00
Falla Camión 797F	Falla de sistema de cabina	Aire acondicionado y calentador	Control automático de	Control de temperatura	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	1	12	USD 50.00	USD 500.00	USD 319.00	USD 10,428.00	0.30%

		temperatura										
Asiento (tela) con suspensión	Asiento (tela) con suspensión rota	Asiento averiado	Mala calibración de asiento	Mala calibración de asiento	2	24	USD 50.00	USD 500.00	USD 497.00	USD 25,128.00	0	0.73%
neumática Comfort Cat	neumática Comfort Cat				2	24	USD 50.00	USD 500.00	USD 224.00	USD 18,576.00	0	0.54%
Calentador y des congelador	Calentador y des congelador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	2	24	USD 50.00	USD 500.00	USD 586.00	USD 27,264.00	0	0.79%
Cabina insonorizada y presurizada con	Cabina insonorizada y presurizada con	Protección de cabina	Ejes en mal estado	Ejes en mal estado	0	0	USD 50.00	USD 500.00	USD 367.00	USD -	-	0.00%
Estructura de Protección en Caso de Vuelcos	Estructura de Protección en Caso de Vuelcos				1	12	USD 50.00	USD 500.00	USD 232.00	USD 9,384.00	-	0.27%
Filtros de aire de cabina	Filtros de aire de cabina	Filtro de aire principal	Filtros saturados	Filtros saturados	0	0	USD 50.00	USD 500.00	USD 250.00	USD -	-	0.00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65: Modos de falla críticos según análisis 80-20

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7	% CRITICIDAD	% ACUMULADO
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	No llega aire al motor.	Admisión de aire mal.	Admisión dañada	6.970%	6.970%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Fallo en inyectores	Falla en inyector	Inyector averiado	6.478%	13.448%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Baja Presión del Aceite del Motor	Cojinetes de bancada gastados.	Cigüeñal dañado	4.859%	18.307%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	El Motor se Apaga a Bajas Revoluciones	Combustible de mala calidad	Falla en filtros saturados	Filtros saturados	3.672%	21.979%

Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto	3.487%	25.466%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	El Motor se Apaga a Bajas Revoluciones	Baja presión de bomba de transferencia	Presión baja	Bomba de transferencia dañada	3.402%	28.867%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Bomba de inyección averiada.	Falta de calibración de inyectores	Inyector dañado	3.261%	32.128%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	El Motor se Apaga a Bajas Revoluciones	Ralentiza demasiado bajo	Falla del regulador de velocidad	Regulador dañado	3.209%	35.338%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Cable acelerador averiado.	Falla en acelerador	Cable roto	3.090%	38.428%
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Capo	Capo Suelto / Agrietado	Tapas de baterías Sueltas	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	3.078%	41.505%
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Chasis	Grietas en el Chasis	Grietas en el Chasis	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	2.963%	44.468%

Falla Camión 797F	Sistema estructural	Guardas	Guardas de Motor Seltas	Pecheras sueltas - Instalación Incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	2.920%	47.388%
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Guardas	Tanque de Combustible Suelto	Grietas en Tanque de Combustible	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	2.834%	50.222%
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Capo	Capo Suelto / Agrietado	Juego en alojamientos del Chasis / lubricación incorrecta	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	2.760%	52.982%
Falla Camión 797F	Sistema estructural	Tanque de combustible	Grietas en Tanque de Combustible	Grietas en el Fender	Mal ajuste	Mal ajuste de pernos	2.689%	55.672%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira a la derecha o a la izquierda por	Válvula de control y dirección y frenos atascada	Fuga interna	2.276%	57.948%

Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Equipo Frenado / Equipo No frena por Embragues de Dirección y frenos con fuga interna	Ajuste incorrecto	Ajuste incorrecto	2.252%	60.200%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira en ninguna dirección	Varillaje Suelto de Dirección	Ajuste incorrecto	1.695%	61.894%
Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla de sistema de dirección	Falla de sistema de dirección	Equipo no gira a la derecha o a la izquierda	Embragues de Dirección con fuga interna	Alto desgaste	1.674%	63.569%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Motor de sincronizado.	Piñón de arrastre de bomba de inyección flojo	Motor fuera de punto	1.655%	65.223%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Fallo en reglaje de válvulas.	Falla en inyector	Mal ajuste	1.642%	66.866%

Falla Camión 797F	Falla de Sistema de Dirección y Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Falla en el Sistema de Frenos	Equipo Frenado	Equipo No frena por Válvula de control y dirección y frenos atascada.	Fuga interna	1.642%	68.507%
Falla Camión 797F	Falla de tren de fuerza	Falla de Motor Cat C27 ACERT	Motor no arranca	Bomba de transferencia averiada.	Falta de aire en el motor.	Filtro de aire suturado	1.640%	70.147%
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Mangueras hidráulicas	Mangueras hidráulicas rotas	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Sobre Nivel de Aceite Tanque Hidráulico	Alta temperatura de Aceite Hidráulico por Válvula de Alivio calibrada a presión muy baja o alta	Falta de calibración	1.547%	71.694%

Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Bombas hidráulicas	Bombas hidráulicas inoperativas	No levanta los Implementos/Implementos Lentos Varillaje Suelto de palanca de levante	No levanta los Implementos/Implementos Lentos Baja Presión de Bomba por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración	1.524%	73.219%
Falla Camión 797F	Falla de sistema de cabina	Aire acondicionado y calentador	Aire acondicionado y calentador	Calentador	Sensor des calibrado	Mala calibración de sensor	1.050%	74.269%
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Sensores	Sensores dañados	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Sodio, entrada de Refrigerante al Sistema Hidráulico	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Cobre, Hierro, Aluminio Bombas con desgaste interno	Contaminación del Aceite de Hidráulico con refrigerante Enfriador de Hidráulico Roto	0.929%	75.198%

Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Mangueras hidráulicas	Mangueras hidráulicas rotas	Implementos se caen Varillaje Suelto de palanca de levante	Implementos se caen Spool de Válvula de Levante atascada por partículas	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0.910%	76.109%
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Sensores	Sensores dañados	Ventilador no gira o con baja velocidad Partió el eje de la bomba / daño del drive del motor	Ventilador no gira o con baja velocidad Válvula solenoide y compensadoras de la fan atascada o con fuga interna	Fuga de aceite	0.902%	77.011%
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	solenoides	solenoides dañados	Fuga Hidráulica por Tubos de Hidráulicos por roce - instalación incorrecta	Fuga Hidráulica por tapa o carcaza de Filtros de Hidráulico- instalación incorrecta	Falta de calibración	0.894%	77.905%

Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	Sensores	Sensores dañados	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Silicio, entrada de tierra al Sistema Hidráulico - Instalación Incorrecta	Análisis de Aceite Critico de Hidráulico SOS por Agua, entrada de agua al Sistema Hidráulico- Instalación Incorrecta	Contaminación del Aceite de Hidráulico	0.888%	78.792%
Falla Camión 797F	Falla de sist. Hidráulico	solenoides	solenoides dañados	Fuga Hidráulica por Enfriador de Hidráulico- instalación incorrecta	Ventilador no gira o con baja velocidad Baja Presión de Bomba de fan por incorrecta calibración de válvula de alivio	Falta de calibración	0.849%	79.642%

Fuente: Elaboración propia

Se cuenta con un total de 121 modos de falla, de los cuales se ha seleccionado 32 modos de fallas críticos (los que ocupan el 80% del IMPACTO TOTAL (Mano de obra, Repuesto, Costo de parada). Los 32 modos de falla seleccionados representan el 26 % del total de modos de falla.



5.4 Análisis causa raiz (ACR)

Tabla 66: Ratios de disponibilidad de flota principal (frente fondos de mina)

	NOMBRE	EQUIPO	Ene-17	Feb-17	Mar-17	Abr-17	May17	Jun-17	Jul-17	Ago-17	Set-17	Oct-17	Nov-17	Dic-17	Promedio 2017
1	CAMIÓN MINERO 797F	RT001	84.46%	76.32%	71.23%	73.27%	83.44%	78.36%	88.53%	85.48%	77.34%	82.43%	76.32%	83.44%	86.50%
2		RT002	71.23%	71.23%	79.37%	83.44%	86.50%	74.28%	80.39%	86.50%	76.32%	69.20%	75.30%	70.21%	83.92%
3		RT003	71.23%	73.27%	88.53%	88.53%	85.48%	69.20%	73.27%	84.46%	84.46%	85.48%	81.41%	69.20%	87.67%
4		RT004	80.39%	76.32%	72.25%	75.30%	85.48%	81.41%	85.48%	74.28%	69.20%	73.27%	76.32%	75.30%	88.14%
5		RT005	77.34%	71.23%	69.20%	88.53%	83.44%	75.30%	75.30%	87.51%	87.51%	84.46%	87.51%	74.28%	84.53%
6		RT006	84.46%	82.43%	88.53%	69.20%	87.51%	71.23%	86.50%	79.37%	75.30%	85.48%	69.20%	88.53%	86.92%
7		RT007	70.21%	75.30%	72.25%	85.48%	72.25%	86.50%	69.20%	80.39%	72.25%	73.27%	88.53%	69.20%	89.32%

Fuente: Elaboración propia

Se procede a realizar el análisis de normalidad en MINITAB se revisa la tendencia de los datos.

Se comprobará en base a la prueba de normalidad el comportamiento de los datos para posterior análisis de fallas.

5.4.1 Análisis de comportamiento de ratios de disponibilidad

Ilustración 21: Prueba de normalidad de datos

Instantánea de la capacidad para RT001
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Normalidad	✔	Sus datos pasaron la prueba de normalidad. Mientras tenga suficientes datos, las estimaciones de la capacidad deberían ser razonablemente precisas.
Cantidad de datos	⚠	El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea	i	<p>La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un periodo de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Instantánea de la capacidad para RT001
Informe de resumen

Histograma
¿Están los datos dentro de los límites y cerca del objetivo?

Gráf. normalidad

Los puntos deberán estar cerca de la línea.

Requerimientos del cliente		
Espec. inferior	Objetivo	Espec. superior
0.88	0.88	1

Caracterización del proceso	
N Total	12
Media	0.80052
Media fuera del objetivo	Si
Valor p	0,00
Desviación estándar	0.053196
Estadísticos de capacidad	
Pp	0.38
Ppk	-0.50
Nivel Z	-1.49
% fuera espec. (observado)	91.67
% fuera espec. (esperado)	93.25
PPM (DPMO) (observado)	916667
PPM (DPMO) (esperado)	932522

Comentarios

Las medidas de capacidad utilizan la desviación estándar general. Sin embargo, el método de recolección de datos utilizado pudiera no captar todas las fuentes de variación que pueden aparecer durante un periodo de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo podría no aplicarse.

Prueba de normalidad (Anderson-Darling)

Resultados	Pasa
Valor p	0.540

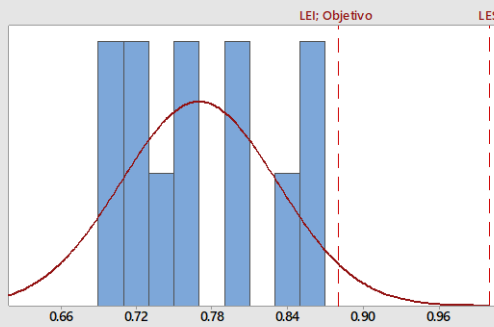
Fuente: Elaboración propia

Instantánea de la capacidad para RT002
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Normalidad		Sus datos pasaron la prueba de normalidad. Mientras tenga suficientes datos, las estimaciones de la capacidad deberían ser razonablemente precisas.
Cantidad de datos		El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea		<p>La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un período de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Instantánea de la capacidad para RT002
Informe de resumen

Histograma
¿Están los datos dentro de los límites y cerca del objetivo?



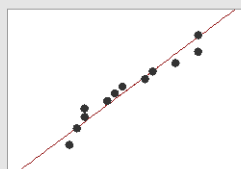
Requerimientos del cliente

Espec. inferior	Objetivo	Espec. superior
0.88	0.88	1

Caracterización del proceso

N Total	12
Media	0.76997
Media fuera del objetivo	Sí
Valor p	0.000
Desviación estándar	0.062038
Estadísticos de capacidad	
Pp	0.32
Ppk	-0.59
Nivel Z	-1.77
% fuera espec. (observado)	100.00
% fuera espec. (esperado)	96.20
PPM (DPMO) (observado)	1000000
PPM (DPMO) (esperado)	962032

Gráf. normalidad



Prueba de normalidad
(Anderson-Darling)

Resultados	Pasa
Valor p	0.407

Comentarios

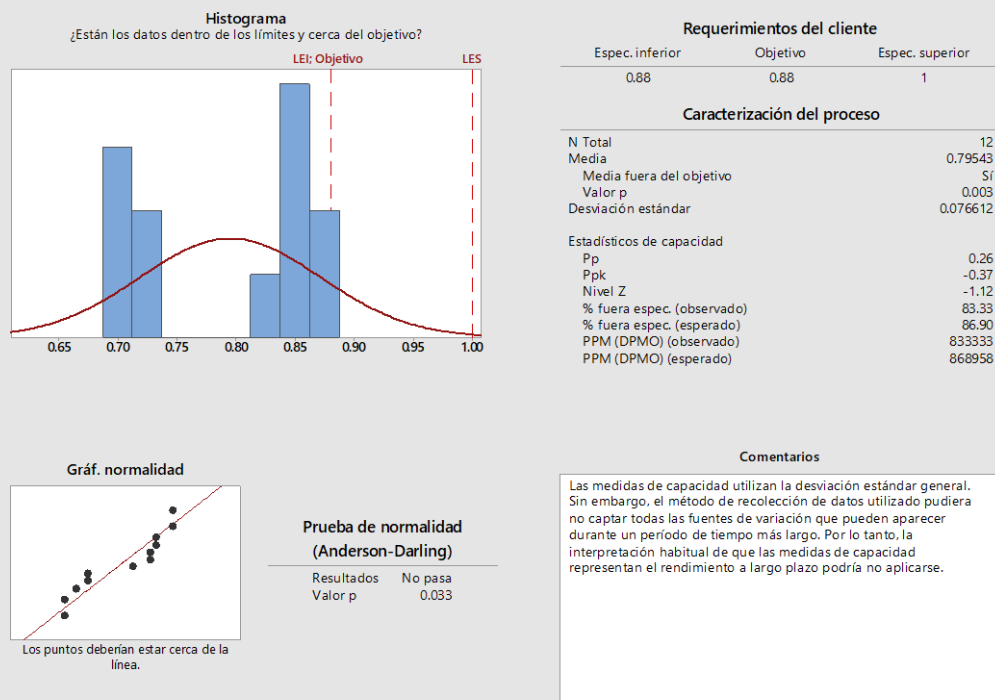
Las medidas de capacidad utilizan la desviación estándar general. Sin embargo, el método de recolección de datos utilizado pudiera no captar todas las fuentes de variación que pueden aparecer durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo podría no aplicarse.

Fuente: Elaboración propia

Instantánea de la capacidad para RT003
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Normalidad		Sus datos no pasaron la prueba de normalidad. Una transformación de Box-Cox no corregirá el problema. Obtenga ayuda para determinar los próximos pasos porque las estimaciones de la capacidad pudieran ser inexactas.
Cantidad de datos		El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea		<p>La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un período de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Instantánea de la capacidad para RT003
Informe de resumen



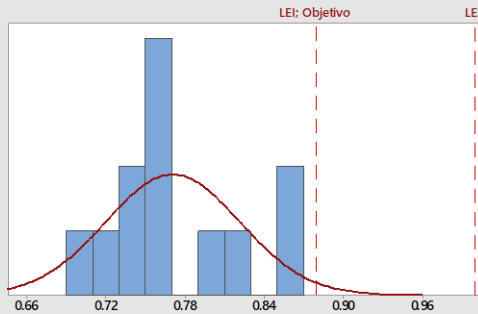
Fuente: Elaboración propia

Instantánea de la capacidad para RT004
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Normalidad		Sus datos pasaron la prueba de normalidad. Mientras tenga suficientes datos, las estimaciones de la capacidad deberían ser razonablemente precisas.
Cantidad de datos		El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea		<p>La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un período de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Instantánea de la capacidad para RT004
Informe de resumen

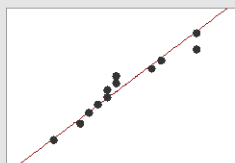
Histograma
¿Están los datos dentro de los límites y cerca del objetivo?



Requerimientos del cliente		
Espec. inferior	Objetivo	Espec. superior
0.88	0.88	1

Caracterización del proceso	
N Total	12
Media	0.77083
Media fuera del objetivo	Si
Valor p	0.000
Desviación estándar	0.050999
Estadísticos de capacidad	
Pp	0.39
Ppk	-0.71
Nivel Z	-2.14
% fuera espec. (observado)	100.00
% fuera espec. (esperado)	98.38
PPM (DPMO) (observado)	1000000
PPM (DPMO) (esperado)	983849

Gráf. normalidad



Prueba de normalidad
(Anderson-Darling)

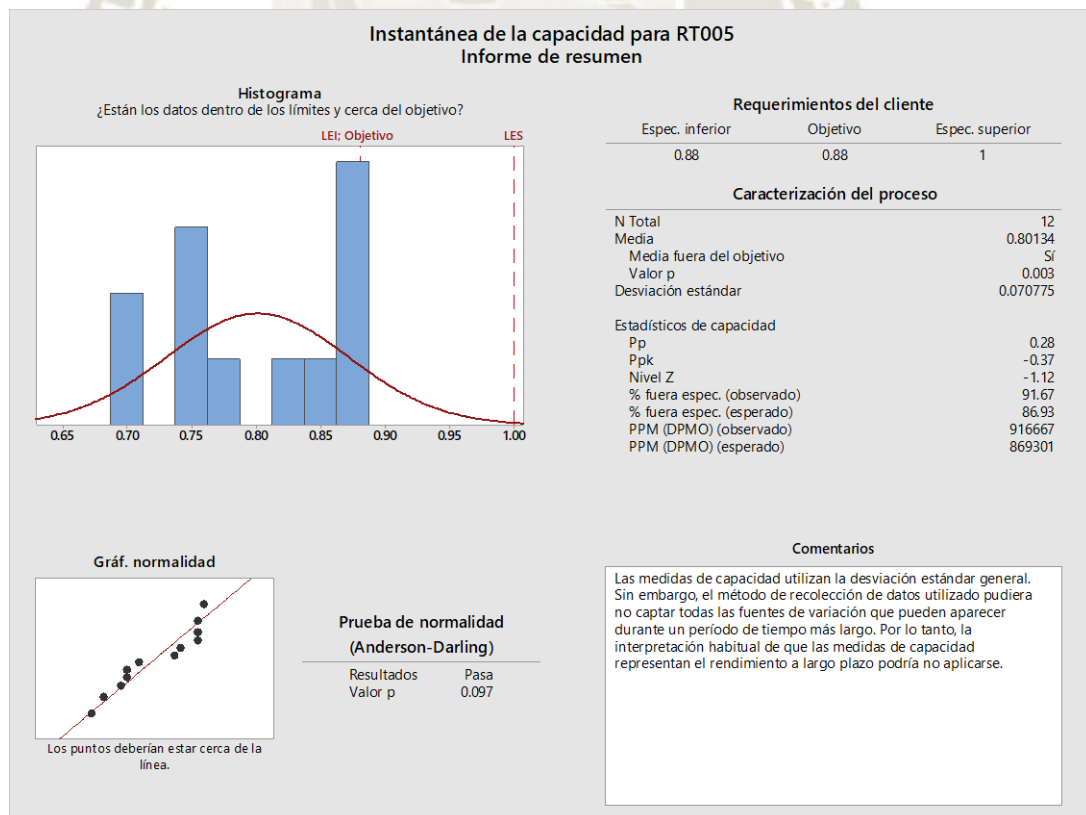
Resultados	Pasa
Valor p	0.301

Comentarios

Las medidas de capacidad utilizan la desviación estándar general. Sin embargo, el método de recolección de datos utilizado pudiera no captar todas las fuentes de variación que pueden aparecer durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo podría no aplicarse.

Fuente: Elaboración propia

Instantánea de la capacidad para RT005 Tarjeta de informe		
Verificar	Estado	Descripción
Normalidad		Sus datos pasaron la prueba de normalidad. Mientras tenga suficientes datos, las estimaciones de la capacidad deberían ser razonablemente precisas.
Cantidad de datos		El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea		<p>La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un período de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.



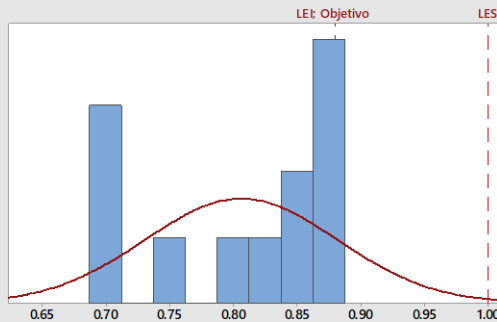
Fuente: Elaboración propia

Instantánea de la capacidad para RT006
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Normalidad		Sus datos pasaron la prueba de normalidad. Mientras tenga suficientes datos, las estimaciones de la capacidad deberían ser razonablemente precisas.
Cantidad de datos		El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea		<p>La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un período de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Instantánea de la capacidad para RT006
Informe de resumen

Histograma
¿Están los datos dentro de los límites y cerca del objetivo?



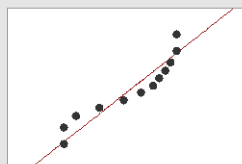
Requerimientos del cliente

Espec. inferior	Objetivo	Espec. superior
0.88	0.88	1

Caracterización del proceso

N Total	12
Media	0.80645
Media fuera del objetivo	Sí
Valor p	0.006
Desviación estándar	0.075540
Estadísticos de capacidad	
Pp	0.26
Ppk	-0.32
Nivel Z	-0.99
% fuera espec. (observado)	83.33
% fuera espec. (esperado)	84.01
PPM (DPMO) (observado)	833333
PPM (DPMO) (esperado)	840088

Gráf. normalidad



Los puntos deberían estar cerca de la línea.

Prueba de normalidad (Anderson-Darling)

Resultados	Pasa
Valor p	0.074

Comentarios

Las medidas de capacidad utilizan la desviación estándar general. Sin embargo, el método de recolección de datos utilizado pudiera no captar todas las fuentes de variación que pueden aparecer durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo podría no aplicarse.

Fuente: Elaboración propia

Instantánea de la capacidad para RT007
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Normalidad		Sus datos no pasaron la prueba de normalidad. La no normalidad puede afectar seriamente las estimaciones de la capacidad. Una transformación corregirá el problema. <ul style="list-style-type: none"> • Si su proceso produce datos no normales de manera natural, usted debería considerar repetir el análisis con una transformación. • Si su proceso produce datos normales de manera natural, usted no debería transformar los datos. Obtenga ayuda para entender las causas de la no normalidad y determinar los próximos pasos, porque las estimaciones de la capacidad pudieran ser inexactas.
Cantidad de datos		El número total de observaciones es menor que 100. Usted pudiera no contar con suficientes datos para obtener estimaciones razonablemente precisas de la capacidad. La precisión de las estimaciones disminuye a medida que se reduce el número de observaciones.
Análisis completo vs. Instantánea		La Instantánea examina los datos como una muestra individual, sin orden cronológico. Si usted recolectó datos en subgrupos racionales (u observaciones individuales) durante un período de tiempo lo suficientemente largo para captar las diferentes fuentes de variación del proceso, debería utilizar el Análisis completo. La Instantánea de todos modos calcula las medidas de capacidad, pero: <ul style="list-style-type: none"> • Usted no puede evaluar la estabilidad del proceso, un supuesto importante para obtener estimaciones confiables. • Usted no puede determinar la capacidad de mejora, que es la diferencia entre la capacidad actual y la capacidad potencial del proceso. • Bajo estas condiciones de recolección de los datos, la desviación estándar general podría no captar todas las fuentes de variación que aparezcan durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Instantánea de la capacidad para RT007
Informe de resumen

Histograma
¿Están los datos dentro de los límites y cerca del objetivo?

LEI: Objetivo LES

Requerimientos del cliente		
Espec. inferior	Objetivo	Espec. superior
0.88	0.88	1

Caracterización del proceso	
N Total	12
Media	0.76236
Media fuera del objetivo	Sí
Valor p	0.000
Desviación estándar	0.070830
Estadísticos de capacidad	
Pp	0.28
Ppk	-0.55
Nivel Z	-1.66
% fuera espec. (observado)	91.67
% fuera espec. (esperado)	95.20
PPM (DPMO) (observado)	916667
PPM (DPMO) (esperado)	952030

Gráf. normalidad

Los puntos deberían estar cerca de la línea.

Prueba de normalidad (Anderson-Darling)

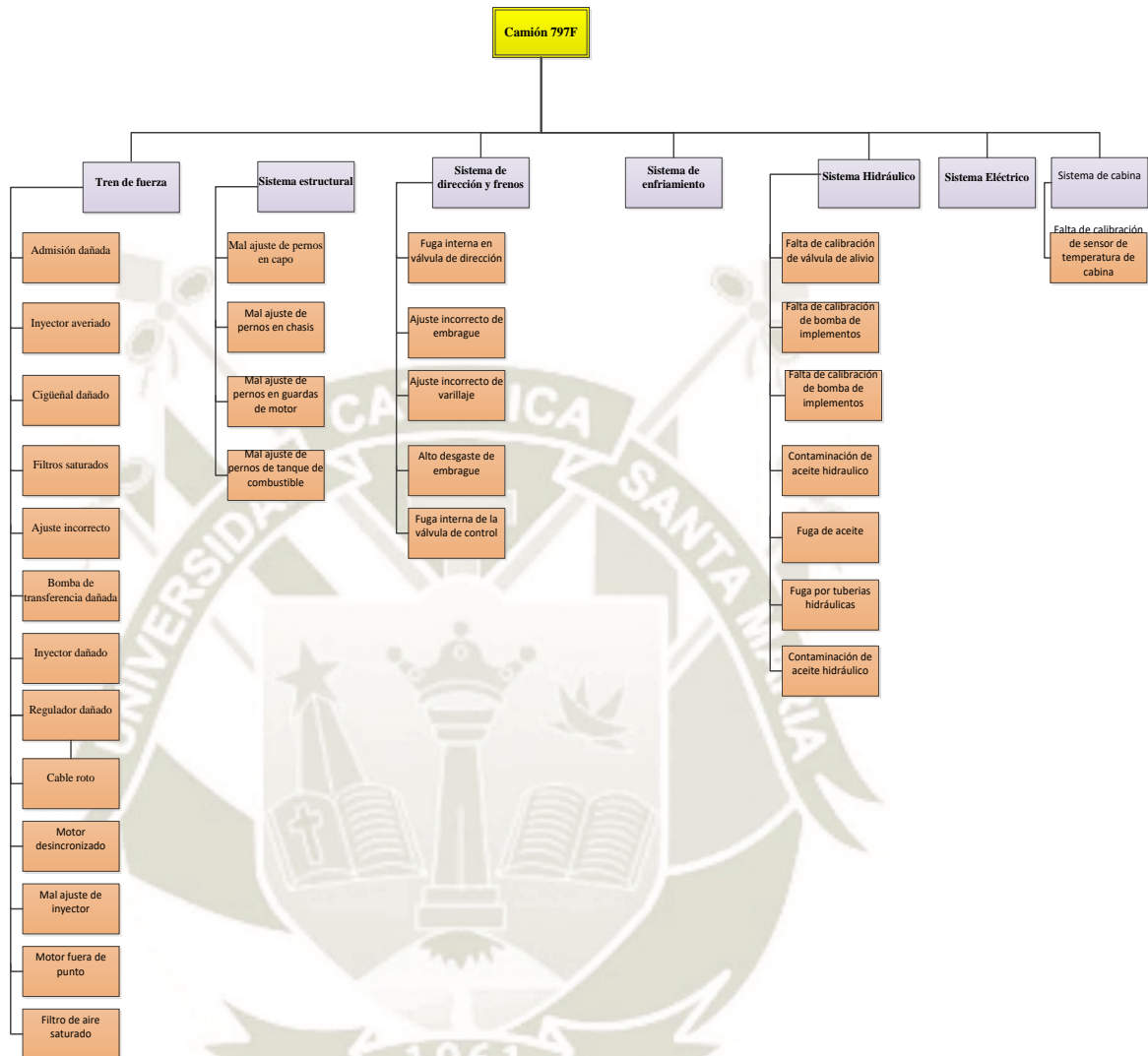
Resultados	No pasa
Valor p	0.022

Comentarios

Las medidas de capacidad utilizan la desviación estándar general. Sin embargo, el método de recolección de datos utilizado pudiera no captar todas las fuentes de variación que pueden aparecer durante un período de tiempo más largo. Por lo tanto, la interpretación habitual de que las medidas de capacidad representan el rendimiento a largo plazo pudiera no aplicarse.

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 22: Diagrama de árbol de modos de falla críticos

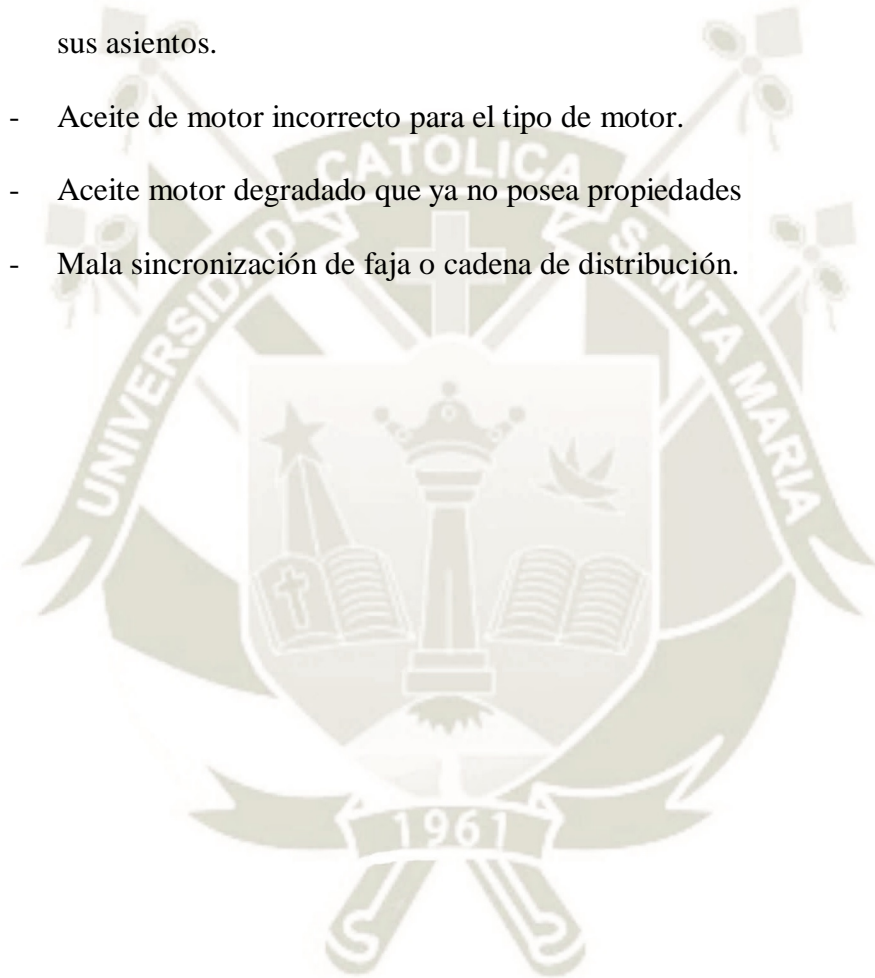


Fuente: Elaboración propia

Analizamos el comportamiento de los camiones **RT003** Y **RT007**, en ellos encontramos con mayor frecuencia a la pérdida de potencia.

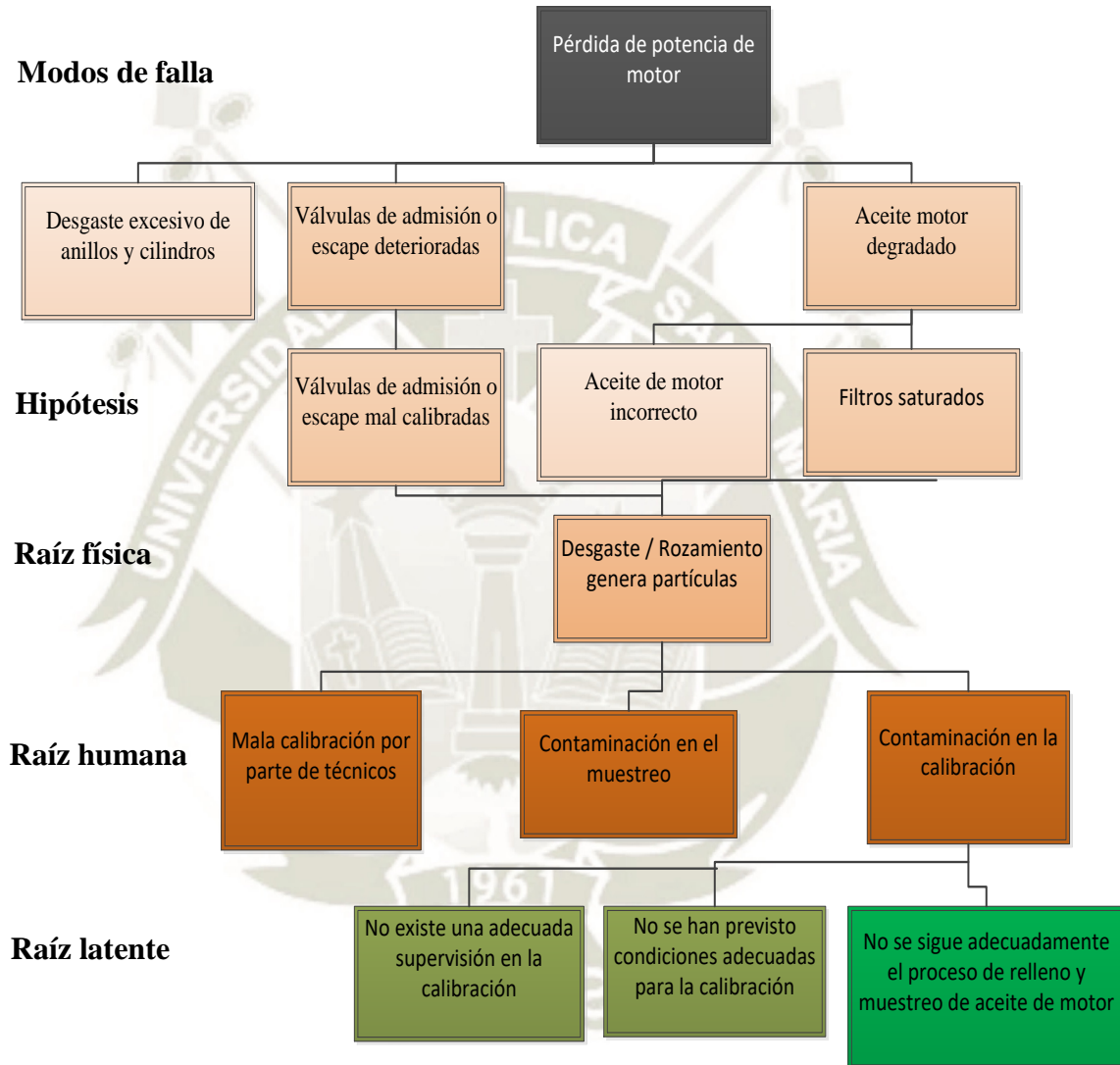
La pérdida de potencia es causada por un mal rendimiento en la fase de compresión y esto es causado por:

- Desgaste excesivo de anillos y cilindros que provoquen holguras por donde escape el aire.
- Válvulas de admisión o escape deterioradas que permitan el escape del aire en el tiempo de compresión.
- Válvulas de admisión o escape mal calibradas que no permitan un buen sello en sus asientos.
- Aceite de motor incorrecto para el tipo de motor.
- Aceite motor degradado que ya no posea propiedades
- Mala sincronización de faja o cadena de distribución.



5.5 Desarrollo de árbol lógico y prueba de hipótesis

Ilustración 23: Árbol lógico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 67: Prueba de hipótesis RCM

Hipótesis	Método de verificación	Responsabilidad	Fecha de realización	Resultados	Factor Certeza
Válvulas de admisión o escape mal calibradas	Prueba de laines	Propio	15/02/2017	Se destapo motor y encontró mala calibración	5
Aceite de motor incorrecto	Prueba de laboratorio	Propio	15/02/2017	Se encontró el aceite correcto	0
Filtros saturados por contaminación	Evaluación de filtros cortados	Propio	15/02/2017	Se hizo el corte de filtros y nuevamente filtros saturados	5

Fuente: Elaboración propia

5.6 Plan de acción

- Se debe seguir el procedimiento para el relleno y muestreo de aceite según el manual de servicio de Caterpillar para el 797F **de forma inmediata.**
- El supervisor o líder mecánico debe validar el chek-list presentado por los técnicos, haciendo recurrencia en la toma de muestras de aceite de motor **permanentemente.**
- Se debe preparar una zona aislada para la adecuada calibración de válvulas del motor para **dentro de 3 meses.**

- Se debe seguir los procedimientos adecuados de calibración validados por el especialista de flota y utilizar las herramientas adecuadas y en buenas condiciones **de forma inmediata.**
- El personal que realice la calibración deberá estar capacitado y será designado por el supervisor o líder **de forma inmediata.**
- Se debe dar seguimiento al plan de acción en base al análisis de fallas realizado.
- El impacto se percibirá inicialmente en los equipos RT003 Y RT007 hasta conseguir eliminar falla crónica.

5.7 Impacto

La estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad se utilizar para utilizar y dosificar correctamente los recursos disponibles en elevar los estándares de confiabilidad de un conjunto de equipos, pero requiere mayor análisis y especialización del área de mantenimiento para lograr estos resultados, además de un sistema e infraestructura que soporte el ingreso de información de calidad y facilite la toma de decisiones. En este estudio se definió como la flota crítica la que se encuentra en fondo de mina, correspondiente a 7 camiones 797F, dado que el contexto operacional en fondo de mina es más agresivo (calidad del aire, pendiente de carrera en subida, entre otros) e implica tener un mejor rendimiento de los equipos para asegurar la continuidad del proceso. Luego de realizar la evaluación, verificamos en base en el FMEA modificado, revisamos que el plan de acción analizado impactaría en el 36% de fallas en el año, lo que equivale a un ahorro anual de USD 1,635,840.00, considerando ninguna inversión adicional a un presupuesto anual, solo un reajuste de los procesos.

CAPITULO VI: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

1. Presentación de resultados

Luego de revisar las técnicas utilizadas en cada estrategia y los resultados recopilamos la siguiente información:

Tabla 68: Resumen e estrategias

Estrategia	Técnicas de evaluación	Disponibilidad esperada	Confiabilidad de sistema	Costo total estimado para 1 equipo en 10 años
Estrategia correctiva	Análisis de Weibull Función de densidad de falla Análisis de confiabilidad	70.86%	63.54%	USD 24,073,741.05
Estrategia condicional	Análisis de frecuencia de inspecciones en base a confiabilidad	87.42%	63.54%	USD 10,504,071.49
Estrategia sistemática	Análisis de costo de ciclo de vida	88.98%	14.52%	USD 9,891,713.27
Estrategia de alta disponibilidad	Análisis de componentes en spare de acuerdo con probabilidad de falla y disponibilidad objetivo	92.50%	63.54%	USD 35,200,000.00
Estrategia aplicando ingeniería de confiabilidad	Identificación de fallas funcionales y modos de falla FMEA modificado Análisis causa raíz (ARC) Análisis de árbol lógico de falla	92.50%	82.88%	USD 16,358,400.00

Fuente: Elaboración propia

El análisis indica que tomar decisiones con respecto a que estrategia utilizar en cada activo impactará en los costos globales y en la continuidad de la operación.

Se revisa con claridad que existe una gran diferencia sobre todo en utilizar una estrategia correctiva y una estrategia basada en ingeniería de confiabilidad, la diferencia no solo radica en los resultados monetarios sino en la calidad del funcionamiento de la empresa y los resultados generales, pero es necesario contar con personal experto que puedan desarrollar una metodología adecuada y un plan de acción

2. Prueba de hipótesis

Se comprueba la hipótesis general y se afirma que:

“Es posible que la aplicación de herramientas de análisis de confiabilidad apoye a una mejor toma de decisiones con respecto a la gestión del mantenimiento de una flota de camiones de acarreo Caterpillar modelo 797F en una operación minera”

Esto se confirma con los resultados analizados y la metodología utilizada para realizar las proyecciones.

3. Aportes y aplicaciones

Los aportes de la investigación se enfocan en demostrar a equipos de mantenimiento en la industria minera o cualquier otro tipo de industria las ventajas y desventajas de utilizar una estrategia de mantenimiento para sus equipos sean móviles o fijos, además de demostrar herramientas para poder realizar un análisis técnico y financiero para la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

Primera conclusión: La mejor estrategia de mantenimiento aplicable a una flota de camiones mineros 797F es la estrategia de mantenimiento basado en ingeniería de confiabilidad demostrada por los indicadores proyectados de disponibilidad de 92.5%, confiabilidad de 82.88% y económicos proyectados (ahorro de USD 16,358,400.00. durante un ciclo de vida de 10 años por equipo).

Segunda conclusión: Las técnicas para definición de criticidad de equipos en base a análisis de fallas y confiabilidad identificarán cuales son las principales fallas a ayudará a focalizar los esfuerzos de mejora.

Tercera conclusión: El análisis de la tendencia de fallas para el cálculo de proyección de fallas se debe realizar en al estudio de los parámetros de comportamiento de fallas previos a un análisis de Weibull.

Cuarta conclusión: Existen estrategias alternativas de mantenimiento que requieren menos especialización y pueden ser aplicadas en base a análisis de riesgo, confiabilidad y costos.

RECOMENDACIONES

Primera recomendación: Para el uso de estrategias avanzadas con ingeniería de confiabilidad se debe establecer un equipo multidisciplinario que conozca los procesos, el equipo y la metodología de RMC.

Segunda recomendación: No se debe descartar las estrategias de mantenimiento correctivo, dado que en ciertos casos es viable mientras se aplique a equipos poco críticos para el proceso productivo.

Tercera recomendación: Es muy importante establecer un sistema de información confiable para poder almacenar datos y luego analizar dicha información para la toma de decisiones.

Cuarta recomendación: Para una flota de equipos o equipos dentro de una planta es recomendable analizar la criticidad de cada equipo y su comportamiento de falla para luego aplicar las estrategias de mantenimiento de manera independiente o combinada.

BIBLIOGRAFIA

- Acuña, J. A. (2003). *Ingeniería de confiabilidad*. Carta, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Alfaro, F. M. (1 de Marzo de 1997). *Oficina Nacional de Gobierno Electrónico e Informática ONGEI*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2015, de <http://www.ongei.gob.pe/publica/metodologias/Lib5081/CAP0522.HTM>
- Alibaba.com. (17 de Noviembre de 2015). *Alibaba.com*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2015, de http://www.alibaba.com/product-detail/WS1361C-USB-sound-level-meter-calibrator_1314684165.html
- Almonte, K. (16 de Diciembre de 2011). <https://www.eoi.es/>. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015, de <https://www.eoi.es/blogs/karlasugeilyalmonte/2011/12/16/kaizen-y-las-5s/ausencorylsones>.
- ausencorylsones*. (7 de Mayo de 2019). Obtenido de *ausencorylsones*: <https://ausencorylsones.wordpress.com/2016/11/16/jackknife-vs-pareto-cual-es-mejor-y-por-que/>
- Barraza, M. F. (2007). *El Kaizen*. México D.F.: Panorama Editorial.
- Bohlander-Snell. (2001). *Administración de recursos humanos*. Thomson/South-Western: Business & Economics .
- ca*. (s.f.). Obtenido de <https://www.cat.com/>
- Campo, J. V. (2004). *Trabajando con los Procesos*. Castilla: Junta de Castilla y León.
- Canecaspulido.com. (s.f.). Recuperado el 23 de Octubre de 2015, de <http://www.canecaspulido.com/JP/index.php/ct-menu-item-21/ct-menu-item-29>

- Carreto, J. (1 de Julio de 2008). *Blog Planeación Estratégica*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2015, de <http://planeacion-estrategica.blogspot.pe/2008/07/factores-crticos-de-xito.html>
- CAT.COM. (07 de 05 de 2019). Obtenido de <https://www.cat.com/>
- Companys-Follosona. (1999). *Nuevas técnicas de gestión de stocks MRP y JIT*. Barcelona, España: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.
- es.fonts2u.com. (2015). <http://es.fonts2u.com/>. Recuperado el 23 de Octubre de 2015, de <http://es.fonts2u.com/bar-code-39.fuente>
- Española, R. A. (2001). *Diccionario de la lengua española (22.a ed.)*. Madrid.
- Figuroa, R. V. (14 de Abril de 2012). *Innovación Estratégica y Tecnológica*. Recuperado el 2 de Enero de 2016, de <http://inn-edu.com/Estrategia/EstrategiaFactoresCriticos.html>
- García-Garrido, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos S.A.
- Garrido, S. G. (2010). *La contratación del mantenimiento industrial*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Gonzáles, M. R. (23 de Diciembre de 2010). *Ingenieria.blog*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2015, de <http://ingenieria83.blogspot.pe/2010/12/contrato-marc.html>
- <http://www.minem.gob.pe/>. (22 de Agosto de 2010). *Página web del Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/2010/AGOSTO/DS%20055-2010--EM.pdf>
- <http://www.minem.gob.pe/>. (22 de Agosto de 2010). *Página web del Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2015, de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/2010/AGOSTO/DS%20055-2010--EM.pdf>

<http://www.minimaquinas.com/>. (s.f.). <http://www.minimaquinas.com/>. Recuperado el 20 de Noviembre de 2015, de <http://www.minimaquinas.com/194-579-large/maquinaria-obra-publica-escala-caterpillar-cat-374d-series-norscot.jpg>

INFORMATIVO, P. (25 de Abril de 2012). *PRODUCCIÓN INFORMATIVO*. Recuperado el 13 de Enero de 2016, de <http://produccion-informativo.blogspot.pe/>

Ipsolutions.com. (s.f.). <http://www.ipsolutions.com.pe/Control-de-asistencia.html>. Recuperado el 22 de Diciembre de 2015, de <http://www.ipsolutions.com.pe/bf-630+.gif>

JIMENEZ, A. J. (24 de Octubre de 2011). *Mantenimiento LA*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2015, de <http://maintenancela.blogspot.pe/2011/10/confiabilidad-disponibilidad-y.html>

KOMATSU. (13 de Diciembre de 2015). *KOMATSU PERU*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2015, de http://www.komatsu.pe/index.php?option=com_content&view=article&id=60&Itemid=252

León, F. C. (1998). *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Murcia, España: Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia.

Maciel, N. (6 de Noviembre de 2014). *Blog Códigos y Trazabilidad*. Recuperado el 15 de Octubre de 2015, de <http://www.tarjenova.com/wp-content/uploads/2013/11/lector-codigos-barras.png>

Márquez, L. A. (2015). “*Optimización de los procesos en el área de mantenimiento para mejorar la productividad de una planta productora de cemento portland.*”. Arequipa: UCSM.

Medrando, C. A. (2013). “*Diseño de un sistema de mejora continua en una embotelladora y comercializadora de bebidas gaseosas de la ciudad de Guayaquil por medio de la aplicación del TPM (Mantenimiento productivo total).*”. Guayaquil: Cesar Augusto Tuarez Medrando.

- MINITAB. (07 de 05 de 2019). *support.minitab.com*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/weibull-distribution/>
- Nieves, A. A. (2011). *Gestión del mantenimiento de instalaciones de energía eólica*. Madrid, España: Editorial Vertice.
- Nova.com, T. (s.f.). <http://www.tarjenova.com/>. Recuperado el 13 de Noviembre de 2015, de <http://www.tarjenova.com/accesorios-tarjetas-plasticas/>
- Perú, M. (s.f.). *MercadoLibre Perú*. Recuperado el 12 de Octubre de 2015, de http://servicio.mercadolibre.com.pe/MPE-416561308-letreros-led-pasamensajes-luminosos-ocasion--_JM
- Quiroz, L. C. (2008). *Estudio de la factibilidad para la implementación de un área de planeamiento, programación y control de la producción para una empresa de alquiler de maquinaria pesada*. Arequipa.
- RAE. (2001). *Diccionario de la lengua española (22.a ed.)*. Madrid.
- reliawiki.org*. (07 de 05 de 2019). Obtenido de [http://reliawiki.org/index.php/Crow-AMSAA_\(NHPP\)](http://reliawiki.org/index.php/Crow-AMSAA_(NHPP))
- REYES, L. Y. (2016). MODELO KANBAN. *SBMAGAZINE REVISTA DE FINANZAS Y ESTRATEGIA*, 30.
- Rivera, L. N. (2006). *Seis Sigma, guía para principiantes*. México: Panorama Editorial S.A.
- S.A, F. (20 de Abril de 2015). www.ferreyros.com.pe. Recuperado el 12 de Noviembre de 2015, de <https://www.ferreyros.com.pe/novedades/noticias/ferreyros-premio-a-los-mejores-operadores-de-equipo-pesado-del-peru>
- S.A., F. (1 de Enero de 2016). *Página web corporativa*. Recuperado el 1 de Enero de 2016, de <https://www.ferreyros.com.pe/nosotros/acerca-de-ferreyros>

- Sacristán, F. R. (2002). *El automantenimiento en la empresa*. Madrid, España: Fundación Confemetal.
- Sacristán, F. R. (2005). *Las 5S: orden y limpieza en el puesto de trabajo*. Madrid, España: FUNDACIÓN CONFEMETAL.
- Sanchez, I. M. (2009). *Diseño de un modelo para aplicar el mantenimiento productivo total a los sectores de bienes y servicios*. México D.F.: Ignacio Martínez Sanchez.
- Solostocks.com. (s.f.). *www.solostocks.com*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2015, de <http://www.solostocks.com/venta-productos/bombas-hidraulicas-accesorios/bombas-hidraulicas/motobomba-para-aceite-de-alta-viscosidad-6681292>
- Suñe-Figueras. (2013). *Casos de ingeniería de organización*. Madrid: OmniaScience.
- tbm.cl. (s.f.). *tbm.cl*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2015, de <http://tbm.cl/tienda/equipamiento-operacion-invierno-para-camionetas/set-de-herramientas/>
- Tovar, A. S. (2009). *Apuntes teóricos y ejercicios de aplicación de gestión del mantenimiento industrial*. Madrid, España: Lulu.com.
- Wikipedia. (12 de Diciembre de 2014). Recuperado el 23 de Noviembre de 2015, de https://es.wikipedia.org/wiki/Ferreyros_SAA
- Wikipedia. (12 de Enero de 2016). https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_justo_a_tiempo. Recuperado el 12 de Enero de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_justo_a_tiempo
- www.amazon.com. (20 de Agosto de 2015). *www.amazon.com*. Recuperado el 20 de Agosto de 2015, de <http://www.amazon.com/Digital-Luminometer-Photometer-Environmental-Illumination/dp/B00LSFHDUG>

www.voltimum.es. (s.f.). www.voltimum.es. Recuperado el 22 de Noviembre de 2015,
de [http://www.voltimum.es/e-catalogue/brand/schneider-
electric/family/interruptores-horarios-ih-ihp-4](http://www.voltimum.es/e-catalogue/brand/schneider-electric/family/interruptores-horarios-ih-ihp-4)

