

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Propuesta de Mantenimiento centrado en Confiabilidad de una Motoniveladora utilizada en el mantenimiento del camino rural Sacsamarca-Pueblo Libre para mejorar su Disponibilidad en una micro y pequeña empresa.

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico-Electricista.

Elaborado por

Fernando Froilan Flores Palomino

[0009-0009-7442-5857](tel:0009-0009-7442-5857)

Asesor

Mag. Alcides Guillermo Joo Aguayo

[0000-0002-8459-8489](tel:0000-0002-8459-8489)

TOMO I DE I
LIMA – PERÚ

2024

Resumen

El presente trabajo de Suficiencia corresponde al estudio del análisis del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) como herramienta para mejorar la gestión de mantenimiento de la maquina pesada de las Micro y pequeñas empresas (MYPE's) especializadas en ingeniería vial, está enmarcado en la ejecución del proyecto Rehabilitación del camino turístico Sacsamarca- Pueblo libre región Huancavelica y tiene como referencia el análisis histórico de fallas y frecuencia de las paradas de maquina durante el año 2021 que produjo indicadores Clave de Desempeño (KPI's) por debajo de lo esperado en el área de mantenimiento.

A partir de la información recabada se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para identificar la alternativa más adecuada de solución para las demoras por fallas no programadas y las paradas totales que perjudican el proceso constructivo, se halló el equipo crítico que mayor incidencia tuvo en la ejecución del proyecto y se lograron identificar los subsistemas crónicos y agudos que afectaron la operación optima.

Determinados los subsistemas se designaron mediante el Análisis de modos y efectos de fallo (AMEF), las correctas y nuevas tareas de mantenimiento preventivo y predictivo. Finalmente se realiza una nueva estrategia de mantenimiento basado en el análisis de confiabilidad y AMEF con la finalidad de lograr una mejora en la gestión de mantenimiento mediante el incremento del tiempo medio entre fallas (MTBF), la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, así como reducir el tiempo medio de reparación (MTTR) y la tasa de fallas.

Palabras clave: Micro y pequeñas empresas, Indicadores Clave de Desempeño, Análisis de modos y efectos de fallo, Mantenimiento Centrado en confiabilidad, Gestión de mantenimiento.

Abstract

The present Sufficiency research corresponds to the study of the analysis of reliability-centered maintenance (RCM) as a tool to improve the maintenance management of heavy machinery of Micro and small companies (MYPE's) specialized in road engineering, it is framed in the execution of the project Rehabilitation of the tourist road Sacsamarca- Pueblo Libre Huancavelica region and has as reference the historical analysis of failures and frequency of machine stops during the year 2021 that produced Key Performance Indicators (KPI's) below expectations in the maintenance area .

Based on the information collected, the Analytical Hierarchical Process (AHP) was used to identify the most appropriate alternative solution for delays due to unscheduled failures and total stops that harm the construction process. The critical equipment that had the greatest impact on the construction process was found. the execution of the project and the chronic and acute subsystems that affected optimal operation were identified.

Certain subsystems were designated through Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), the correct and new preventive and predictive maintenance tasks.

Finally, a new maintenance strategy is carried out based on the analysis of reliability and FMEA with the purpose of achieving an improvement in maintenance management by increasing the mean time between failures (MTBF), reliability, availability and maintainability, as well as reducing mean time to repair (MTTR) and failure rate.

Keywords: Micro and small businesses, Key Performance Indicators, Analysis of failure modes and effects, Reliability-focused maintenance, Maintenance management.

Prólogo

El trabajo de suficiencia profesional mostrado tiene como finalidad mejorar los KPI's de mantenimiento en la maquinaria pesada utilizadas en las MYPE's dedicadas a la ingeniería vial con una gestión de mantenimiento eficiente mediante la utilización del RCM.

El primer capítulo aborda el tema de la introducción, donde se desarrollan las generalidades, la descripción del problema en el contexto post pandemia y se explica su relación con las pérdidas económicas y retrasos en la ejecución de los proyectos de construcción vial, el objetivo, los antecedentes investigativos internacionales y nacionales que sirven como guía del presente trabajo.

El segundo capítulo tiene como título marco teórico y conceptual, los cuales describen los fundamentos básicos del RCM (Mantenimiento centrado en la Confiabilidad), clasificación y tipos de fallas, también se hace énfasis y se detallan los conceptos de modos y efectos de fallas.

El tercer capítulo contiene la hipótesis y operacionalización de variable dependiente e independiente con sus respectivos indicadores que se desarrollan en el trabajo de investigación.

El cuarto capítulo titulado metodología de la investigación, se explica el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis (especifica el lugar y empresa donde se desarrolla la investigación) y la matriz de consistencia.

El quinto capítulo es el desarrollo del trabajo de investigación y este abarca la interacción entre las variables para lograr los objetivos de la investigación, el procesamiento de las paradas no programadas, los cálculos de KPI's necesarios y el desarrollo del AMEF con el planteamiento de un nuevo plan de gestión de mantenimiento.

El sexto capítulo describe el análisis y discusión de resultados del trabajo desarrollado en el capítulo anterior. Se realiza la contrastación de hipótesis del trabajo de investigación y una comparación con el estado inicial.

Finalmente, se exponen las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos del trabajo de suficiencia profesional.

Índice

1. Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de Investigación	2
1.3 Objetivo del estudio	4
1.4 Antecedentes Investigativos	5
1.4.1 Antecedentes Internacionales.....	5
1.4.2 Antecedentes Nacionales.....	7
2. Capítulo II. Marco Teórico y Conceptual	11
2.1 Mantenimiento.....	11
2.2 Tipos de Mantenimiento.....	11
2.2.1 Mantenimiento Correctivo.....	11
2.2.2 Mantenimiento Preventivo	12
2.2.3 Mantenimiento Predictivo.....	12
2.3 Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP).....	15
2.3.1 Matriz de comparación de pares.....	15
2.3.2 Cálculo de los pesos de las alternativas	16
2.3.3 RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad):	16
2.3.4 La Función Primaria de un Activo	18
2.3.5 La función secundaria de un activo.....	19
2.3.6 Modo de Falla.....	20
2.4 Marco Conceptual.....	26
3. Capítulo III. Hipótesis y Operacionalización de Variables.....	27
3.1 Hipótesis.....	27
3.2 Variables e Indicadores	27
4. Capítulo IV. Metodología de la Investigación.....	28

4.1	Tipo y diseño de la Investigación.....	28
4.2	Unidad de Análisis	28
4.3	Matriz de Consistencia	31
5.	Capítulo V. Desarrollo del Trabajo de Investigación	32
5.1	Fase Preliminar	33
5.1.1	Descripción del Proceso Constructivo.....	34
5.1.2	Descripción de la Estrategia general de Mantenimiento	35
5.1.3	Matriz AHP (Análisis de Procesos Jerárquicos).....	36
5.1.4	Comparación de alternativas	43
5.2	Fase I	47
5.3	Fase II	47
5.3.1	Criticidad	48
5.3.2	Cálculo de KPI's iniciales de la motoniveladora	52
5.3.3	Diagrama Nelson Allen	54
5.3.4	Cálculo del MTBF y Confiabilidad	56
5.3.5	Cálculo de la Mantenibilidad	60
5.3.6	Disponibilidad inicial	63
5.4	Fase III	63
5.4.1	Elección del sistema y definición de su contexto operacional	63
5.4.2	Diagrama Operacional (EPS)	64
5.4.3	Estándares de ejecución	66
5.5	Fase III AMEF Descripción de las Fallas Funcionales de la Motoniveladora	68
5.5.1	Árbol Lógico de Decisiones	81
6.	Capítulo VI. Análisis y Discusión de resultados.....	83
6.1	Fase IV Descripción de la nueva estrategia de mantenimiento.....	83
	Mantenimiento Correctivo:	83
	Mantenimiento Preventivo:.....	83

Mantenimiento Predictivo:	83
6.2 Análisis de resultados.....	84
6.3 Contrastación de los Resultados	87
6.3.1 Análisis del MTBF y la Confiabilidad Final	87
6.3.2 Análisis del MTBF.....	88
6.3.3 Tasa de Fallas	89
6.3.4 Confiabilidad final julio-diciembre.....	89
6.3.5 Análisis del MTTR y Mantenibilidad Final julio-diciembre.....	91
6.3.6 Análisis del MTTR	92
6.3.7 Análisis de la Mantenibilidad.....	92
6.3.8 Análisis de la Disponibilidad	93
7. Conclusiones	94
8. Recomendaciones	96
9. Referencias Bibliográficas.....	97
10. Anexos.....	1

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Variables e Indicadores.....	27
Tabla 4.1 Matriz de Consistencia.....	31
Tabla 5.1 Listado de Equipos.....	34
Tabla 5.2 Escala de Thomas Saaty	37
Tabla 5.3 Criterios AHP	38
Tabla 5.4 Ponderación de criterios.....	41
Tabla 5.5 Normalización de la matriz de criterios.....	42
Tabla 5.6 Comparación de alternativas – Criterio C1	43
Tabla 5.7 Comparación de alternativas – Criterio C5	43
Tabla 5.8 Comparación de alternativas – Criterio C11	44
Tabla 5.9 Selección de alternativas Modelo Proceso Analítico Jerárquico	44
Tabla 5.10 Evaluación de consistencia – Criterio 1.....	45
Tabla 5.11 Evaluación de consistencia – Criterio 5.....	45
Tabla 5.12 Evaluación de consistencia – Criterio 11	46
Tabla 5.13 Criterios de criticidad.....	48
Tabla 5.14 Ponderación de la criticidad	49
Tabla 5.15 Nivel de criticidad	49
Tabla 5.16 Matriz de asignación de puntajes según el nivel de impacto	50
Tabla 5.17 Criticidad de los equipos	51
Tabla 5.18 KPI's Iniciales	52
Tabla 5.19 STTR inicial.....	53
Tabla 5.20 Parámetros de la confiabilidad	57
Tabla 5.21 Confiabilidad	59
Tabla 5.22 Mantenibilidad enero-junio	61
Tabla 5.23 Descripción de la motoniveladora	63
Tabla 5.24 Diagrama EPS	64

Tabla 5.25 Función Primaria	65
Tabla 5.26 Función Secundaria	65
Tabla 5.27 Estándares de ejecución	66
Tabla 5.28 Estándares de ejecución	67
Tabla 5.29 AMEF Subsistema 1 Tren de Fuerza y Estabilidad	68
Tabla 5.30 AMEF Subsistema 2 Fallas en la Hoja	71
Tabla 5.31 AMEF Subsistema 3 Fallas en el Sistema Hidráulico	72
Tabla 5.32 AMEF Subsistema 4 Falla en el Motor	75
Tabla 5.33 AMEF Subsistema 5 Fallas en el Sistema Eléctrico	79
Tabla 6.1 KPI's Finales.....	85
Tabla 6.2 Parámetros de la Confiabilidad final	87
Tabla 6.3 Mantenibilidad final	91

Índice de Figuras

Figura 1.1 Incremento de costos de transporte marítimo global.....	2
Figura 1.2 Porcentajes de inflación anual del Perú 2015 -2022	3
Figura 4.1 Ubicación geográfica del proyecto	29
Figura 4.2 Organigrama de la empresa	30
Figura 5.1 Flujograma de aplicación RCM a seguir.....	33
Figura 5.2 Proceso constructivo del mantenimiento de un camino rural.....	35
Figura 5.3 Flujograma de la estrategia de mantenimiento inicial.....	36
Figura 5.4 Diagrama de Jack Knife.....	54
Figura 5.5 Diagrama de Nelson Allen	55
Figura 5.6 Distribución de Probabilidad Weibull	55
Figura 5.7 Parámetros β , η	58
Figura 5.8 Confiabilidad enero- junio	60
Figura 5.9 Parámetros β y η Mantenibilidad.....	62
Figura 5.10 Mantenibilidad enero-junio	62
Figura 5.11 Árbol de Decisiones proceso de ejecución del mantenimiento	82
Figura 6.1 Comparación de las fallas por cada subsistema	86
Figura 6.2 Diagrama Nelson Allen julio-diciembre.....	86
Figura 6.3 Parámetros β,η	88
Figura 6.4 Tasa de Fallas	89
Figura 6.5 Comparación de la confiabilidad inicial y final	90
Figura 6.6 Parámetros β,η	91
Figura 6.7 Comparación de la Mantenibilidad inicial y final	93

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

Las vías de comunicación son fundamentales para la interconexión, comercio y transporte de mercancías y ciudadanos, el mantenimiento de los caminos rurales es una tarea importante para garantizar su seguridad y funcionalidad. El mantenimiento adecuado puede ayudar a prolongar la vida útil de los caminos rurales y reducir los costos de reparación.

Debido a su vital importancia es necesario reducir el tiempo de ejecución de los proyectos de ingeniería vial y evitar retrasos en la entrega de obra.

(Shear & Keller, 2004) La motoniveladora es una máquina pesada de acarreo que se utiliza para nivelar y perfilar superficies. Es una herramienta esencial para el mantenimiento de caminos rurales, ya que permite realizar una serie de tareas importantes, incluyendo:

Rasante: El rasante es el proceso de nivelar la superficie de un camino para que tenga una pendiente uniforme. Esto es importante para garantizar que el agua se drene de manera adecuada y que el camino sea seguro para la circulación.

Compactación: La compactación es el proceso de reducir el espacio entre las partículas de un suelo para que sea más fuerte. Esto es importante para prolongar la vida útil del camino.

Excavación: La motoniveladora se puede utilizar para excavar zanjas y cunetas para el drenaje.

La presente investigación es importante porque mediante el RCM se mejorará la disponibilidad de los equipos de construcción y se reducirán las fallas, permitiendo cumplir con los términos técnicos contractuales de obra generando un importante ahorro económico.

Además, la presente investigación permitirá a los lectores conocer los resultados de la implementación una metodología y un sistema de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad aplicado a la maquinaria de construcción.

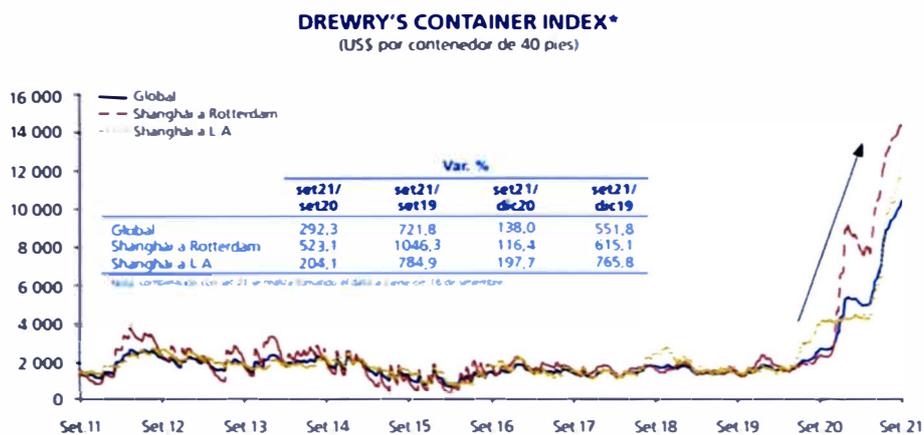
1.2 Descripción del problema de Investigación

(Sifonte, 2017) A partir del año 1970, cuando no existían buenas prácticas y estudios en la ingeniería de mantenimiento; los altos costos de mantenimiento estaban directamente relacionados con las fallas frecuentes de componentes que no eran resueltos de manera eficiente, esto generó la necesidad de explorar nuevas soluciones.

(Reservados, s.f.) Las MYPES representan el 97% del total de empresas en el Perú y el 52 % se dedican al rubro de servicios dentro de este rubro se encuentran las constructoras especializadas en ingeniería vial, por tal motivo el estudio de la gestión de mantenimiento dentro de las MYPES se hace importante por la amplia cantidad de empresas existentes y el beneficio económico que se puede obtener si se intenta aumentar la productividad en el proceso constructivo vial.

Un efecto de la pandemia global posterior al año 2020 generó una serie de dificultades en el transporte marítimo que se reflejaron, entre otros factores, en el aumento de costo de fletes a nivel mundial como se muestra en (ver Figura 1.1).

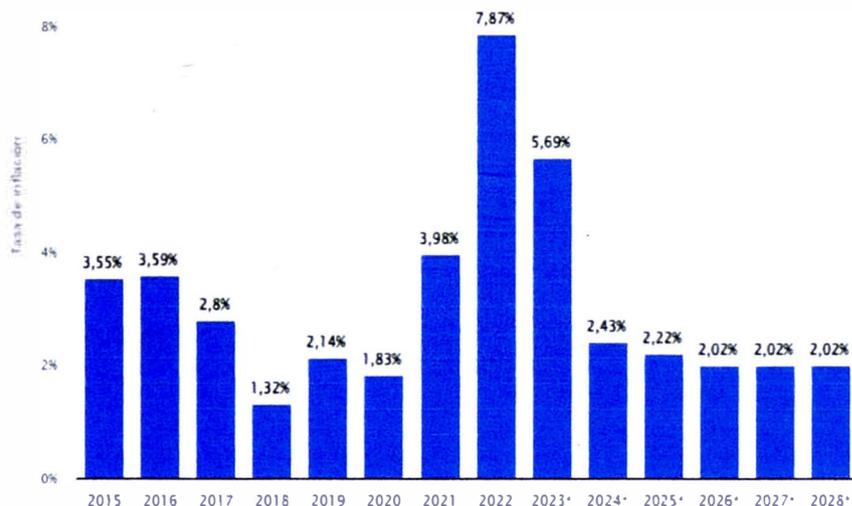
Figura 1.1 Incremento de costos de transporte marítimo global



Fuente: BCRP (2021), Recuperado de <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2021/setiembre/ri-setiembre-2021-recuadro-4.pdf>

Asimismo, la elevación de la inflación en el Perú también incremento los costos de importación de piezas y repuestos necesarios (hoja, bastidor, etc.), los precios desarrollaron un sobre costo que resulta proporcional al incremento de la tasa de inflación del 7.87% (Ver Figura 1.2).

Figura 1.2 Porcentajes de inflación anual del Perú 2015 -2022



Fuente: <https://es.statista.com/estadisticas/1190212/tasa-de-inflacion-peru/>

Las fallas repetitivas en maquinaria pesada de ingeniería vial que no cuentan con un plan de acción inmediato, impiden una solución rápida y eficaz que generan un retraso en la ejecución de los proyectos de construcción.

La motoniveladora desempeña el factor más importante en la construcción y mantenimiento de caminos rurales, debido a que es utilizada para aplanar el suelo, afilar taludes y nivelar cualquier superficie inclinada respecto al terreno horizontal de referencia.

La no disponibilidad de este equipo durante el proceso constructivo detiene la operación y actividades programadas en la ejecución de las obras de ingeniería vial, generando pérdidas económicas debido al incumplimiento de los plazos otorgados por las entidades contratantes del servicio.

La mala práctica de ingeniería de no registrar los datos en un formato dificulta la identificación certera de los parámetros de mantenimiento (confiabilidad y disponibilidad) que son indispensables para evaluar una gestión de mantenimiento adecuado en las principales maquinarias pesadas en ingeniería vial.

La falta de disposición de un registro del tiempo entre fallas (TBF), tiempo para el fallo (TTF), ni del tiempo de reparación de fallas (TTR) de los equipos es causa de una gestión de mantenimiento deficiente en el cual no se podrán identificar adecuadamente los sistemas con mayor deficiencia.

Si la identificación de los equipos críticos se realiza de manera empírica entonces no existe registro de su evaluación, tampoco se contará con un método adecuado de selección de los equipos críticos para su posterior análisis de efectos de falla.

Las acumulaciones de estas deficiencias ocasionan que se pongan en práctica inadecuadas frecuencias o ciclos de mantenimiento, ocasionando gastos económicos a la empresa, por tal motivo resulta imprescindible realizar una investigación que resuelva estas ineficiencias. Debido a lo mencionado previamente se plantea el siguiente problema de investigación:

¿En qué medida una inadecuada gestión de mantenimiento de la maquinaria pesada genera retrasos en los plazos de ejecución de obras viales, sobrecostos y disminución de los indicadores de mantenimiento en las MYPE's especializadas en Ingeniería Vial?

1.3 Objetivo del estudio

Mejorar la gestión de mantenimiento y disponibilidad de la maquinaria pesada utilizadas en las MYPE's especializadas en Ingeniería Vial basado en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

1.4 Antecedentes Investigativos

1.4.1 Antecedentes Internacionales

(Xudong & Xiuyan, 2019) Fudan-China En este trabajo de investigación el objetivo es determinar los principales problemas de reparación y mantenimiento de la maquinaria pesada de construcción, a partir de la evaluación del tiempo, el tiempo medio entre Falla (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR) y estudios relacionados, Los autores refieren que el mantenimiento constante de los caminos rurales es necesario porque la superficie del camino está diseñada sin pavimento de asfalto o concreto y con el tránsito de vehículos pesados genera que tenga una reducida durabilidad. El desempeño deficiente de las carreteras de acarreo tendrá un impacto en el aumento de los costos de producción y la disminución de la productividad. La programación actual de mantenimiento de caminos de acarreo afirma los autores se basa generalmente solo en el conocimiento de los operadores y supervisores de campo y la observación de las condiciones actuales del camino, debido a estas razones el mantenimiento de caminos de acarreo no se ha realizado de manera sistemática.

Los autores concluyen que todas estas circunstancias producen como resultado una baja calidad de reparación y confiabilidad, algunas pérdidas originalmente evitables, incluso ocurren fallas graves por accidentes, sugieren contramedidas y precauciones con el objetivo de atraer más la atención del personal relacionado y elevar el nivel del servicio de reparación. Esta investigación contribuye al presente trabajo de suficiencia en demostrar que el mantenimiento predictivo 4.0 contribuye significativamente en una sustancial mejora en la gestión de activos de la maquinaria pesada utilizada en la construcción vial.

(Anjay, 2020) Este artículo plantea como objetivo monitorear el estado y diagnosticar las fallas de los sistemas de ingeniería que son críticos para el funcionamiento estable y confiable en la maquinaria de construcción, los volquetes, motoniveladoras, rodillos y cargadores frontales son parte integral de la industria de la

construcción y juegan un papel vital en el desempeño en la construcción de carreteras utilizados activamente en las empresas de construcción en Katmandú, Nepal.

Los autores argumentan que, para lograr un nivel satisfactorio de confiabilidad durante la vida útil de una máquina, la estrategia de mantenimiento proactivo es la única clave, la aplicación de métodos de confiabilidad clásicos adecuados para componentes con fallas repentinas puede complementarse con métodos de diagnóstico técnico que tienen el potencial de proporcionar información sobre el estado del sistema.

La conclusión de los autores es que los volquetes son los equipos con mayor criticidad y necesitan mantenimiento después de la utilización de 94 horas, que resulta menos que la práctica estándar de 100 horas. La disponibilidad media del equipo es de 0,91 frente al estándar mínimo de 0,95.

El trabajo de investigación colabora con el presente trabajo de suficiencia en comparar las principales causas de retraso en el mantenimiento, teniendo en consideración las similares condiciones climáticas, diseño y construcción de los caminos rurales en Nepal y Perú.

(Tianliang & Yuanzheng, 2020) Desarrollo y tecnologías clave de maquinaria de construcción puramente eléctrica". Zhejiang-China En este artículo los autores sostienen que utilizando la estadística que la Industria 4.0 se colabora directamente a la revolución tecnológica y la posibilidad de realizar un mantenimiento predictivo que contribuye a mejorar el tiempo de inactividad de la máquina, los costos, el control y la calidad de la producción.

Los autores realizan un análisis experimental y explican los siguientes puntos:

Se discuten las tecnologías clave del sistema de accionamiento eléctrico puro aplicado a la maquinaria de construcción.

Se analizan las diferencias entre la energía eléctrica pura utilizada en maquinaria de construcción y la energía eléctrica pura utilizada en los otros campos.

Se discuten el desarrollo, los componentes centrales, el prototipo típico y los desafíos de la maquinaria de construcción.

Concluyen que la informática, incluida la inteligencia artificial y los campos de la computación distribuida, está cada vez más presente en un área donde la ingeniería era la experiencia dominante, destacando la importancia de un enfoque multidisciplinario para abordar la Industria 4.0 de manera efectiva.

Como principales aportes al trabajo de suficiencia se discuten los desafíos y limitaciones actuales en el mantenimiento predictivo considerando las necesidades de la Industria 4.0.

1.4.2 Antecedentes Nacionales

(Canchanya & Gregorio, 2019) En esta tesis los autores plantean como objetivo mejorar la estrategia de gestión de mantenimiento del área de palas hidráulicas de la compañía minera MISKI MAYO SAC, para eso aplican el análisis Jack Knife, Pareto, Análisis de confiabilidad, Análisis de ciclo de vida y AMEF, los autores sostienen que las técnicas mencionadas proporcionaron muy buenos resultados en los manejos de gestión de activos y en las mejoras en la gestión de mantenimiento. En esta investigación existe una descripción detallada de las variables que intervienen en la gestión de mantenimiento.

Para el estudio los autores tomaron en cuenta las distintas paradas del equipo medidas en tiempo (horas) y contabilizaron el número de eventos para equipo y así como también el número de paradas que se aprecian en los distintos sistemas y subsistemas de la flota de carguío.

En la tesis los autores proponen lo siguiente:

-El análisis anual de paradas de los equipos de flota de carguío contribuirá a evaluar el estado situacional de la estrategia de gestión mantenimiento.

-El análisis de dispersión logarítmica (Jack Knife) contribuirá a identificar los subsistemas crónicos y agudos que más fallas tienen en la flota de carguío para la mejora de la estrategia de gestión de mantenimiento.

- El AMEF de los subsistemas crónicos y agudos contribuirá a mejorar la estrategia de gestión del plan de mantenimiento.

-El análisis de confiabilidad y de ciclo de vida de los componentes hidráulicos contribuirá a mejorar la estrategia de cambio de componentes hidráulicos.

La tesis contribuye al presente trabajo de suficiencia por qué sirve de guía para la implementación de nuevas tareas de monitoreo de la condición en el área predictiva como: Mediciones termográficas de los principales componentes hidráulicos, mediciones de conteo de partículas en el aceite, etc.

Los autores concluyen que es imprescindible realizar un Análisis de modos y efectos de fallo a cada uno de los principales sistemas del equipo, para identificar las principales causas y poder definir los principales lineamientos de cada una de las estrategias de mantenimiento de la flota de carguío.

(Valverde & Arestegui, 2019) En esta tesis los autores evalúan y analizan el estado situacional de los equipos críticos de la Planta de Chancado de la Unidad Minera Antapaccay, con el objetivo de mejorar el Plan de Mantenimiento mediante la aplicación de las herramientas de la Confiabilidad. Con ese propósito los autores recopilan la información precisa para el análisis de la confiabilidad y proponen un Sistema de Registro de Fallos, también un Sistema de Evaluación de Criticidad orientado a equipos mineros que servirán para identificar a los equipos críticos, a continuación se analizan las funciones de los equipos, observando cuáles son sus posibles fallas, las causas de fallas, sus efectos y analizando sus consecuencias, los autores emplean herramientas cuantitativas como la evaluación del tiempo medio entre fallos y tiempo medio de reparación, evaluación de los índices de Disponibilidad, Confiabilidad y tasas de fallos con el fin de determinar el ciclo óptimo de mantenimiento.

La Tesis contribuye al presente trabajo de suficiencia por qué sirve como referencia en la utilización del software Reliability Analytics Toolkit que está basado en la distribución probabilística de Weibull que permite el cálculo el parámetro de forma (β)

y la vida característica (η), con los cuales se podrá conocer la ecuación y curva de la confiabilidad de los equipos críticos.

Los autores concluyen con la presentación de un nuevo Plan de Mantenimiento que mejora la actual gestión de mantenimiento, que según indican redujo las paradas de plantas, logrando ahorros del 10% en los costos de mantenimiento aumentando la producción.

(Santos & Sayri, 2019) En esta tesis de posgrado los autores investigan la relación del incremento de la disponibilidad, basado en la mejora de la gestión del mantenimiento preventivo, que según los autores engloba directamente a la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos críticos en el proceso de micronización del carbonato de calcio.

Los autores toman como punto de partida la identificación de la criticidad de los equipos en el proceso global de producción, se determinan el modo, causa y mecanismo de fallo, los autores consideran de gran importancia definir la función o tarea operacional de cada equipo.

La metodología que emplean los autores es correlacional estadístico, utilizan el análisis de variable continua por el método de regresión lineal, apoyándose en la tendencia de Weibull debido a que se encuentra en un periodo de desgaste en el cual la tasa de fallo es variable.

La tesis contribuye a la presente investigación en el análisis de los resultados que según los autores demuestran que para incrementar la disponibilidad (en rango de 82 - 98%), se basa en un incremento de la confiabilidad (MTBF) y mantenibilidad (MTTR) del proceso de micronización, los autores afirman que si se obtiene una alta confiabilidad, la disponibilidad está asegurada, pero si se tiene una alta disponibilidad no necesariamente, ocurre lo contrario; Debido a esta premisa los autores hacen énfasis en la importancia de los factores que componen la confiabilidad que influyen en los resultados de la gestión de mantenimiento.

Finalmente, para alcanzar estos objetivos de la tesis los autores realizaron el análisis estadístico, anterior a la propuesta de mejora y posterior a ella, a partir de esta comparación se evaluó la reducción de los eventos de fallos de los equipos críticos. Los autores concluyen que para el análisis del proceso continuo es conveniente considerar la disponibilidad del sistema, a partir de ello se determinarán realmente el MTTR y MTBF del conjunto.

Capítulo II. Marco Teórico y Conceptual

2.1 Mantenimiento

(Yañez, 2007) Es la combinación de todas las acciones técnicas y de gestión que tienen la intención de mantener las condiciones requeridas de diseño, funcionamiento, instalación y puesta en operación los equipos, máquinas, componentes e instalaciones involucrados dentro del proceso constructivo vial, o en su defecto restaurar los equipos a un estado en que pueda realizar lo requerido.

Esta serie de actividades incluyen una combinación de conocimiento, experiencia, habilidad y trabajo en equipo que, aunado con las otras dependencias de la organización, permiten que se desarrolle una buena labor administrativa y operativa, cumpliendo así con los indicadores de desempeño y de gestión que cada organización aplica con la intención que sus metas a corto mediano y largo plazo se alcancen.

2.2 Tipos de Mantenimiento

2.2.1 *Mantenimiento Correctivo*

(Sifonte, 2017) "Mantenimiento centrado en la confiabilidad" El mantenimiento correctivo en Perú y Latinoamérica es utilizado en un alto porcentaje. Este mantenimiento correctivo se aplica cuando las máquinas y equipos dejan de operar, debido a que se presenta la falla o avería y su objetivo es poner en marcha su funcionamiento, afectando lo menos posible el avance del proceso constructivo; generalmente se repara o se reemplaza el componente del equipo o de la máquina, haciéndolo en el menor tiempo posible.

En el caso de las MYPE's las estrategias de mantenimiento son enfocadas al correctivo, debido a su limitado personal de mantenimiento que no cuentan con los conocimientos, herramientas, personal calificado, presupuestos asignados y tecnologías modernas para aplicar otros tipos de mantenimiento.

Se pueden encontrar dos tipos de mantenimiento correctivo:

El mantenimiento correctivo no programado: se activa, cuando aparece la falla en el equipo o máquina, generando la respectiva parada, de manera que se debe quitar lo averiado y reponer el componente, ya sea nuevo o reutilizado.

El mantenimiento correctivo programado o planificado: se realiza cuando se detecta que algún componente de una máquina está próximo a fallar, por lo tanto, se programa el mantenimiento para corregir esta posible falla.

2.2.2 Mantenimiento Preventivo

(Sifonte, 2017) El mantenimiento preventivo se fundamenta en una serie de labores o actividades planificadas que se llevan a cabo dentro de periodos definidos, se diseña con el objetivo de garantizar que los activos de las MYPES cumplan con las funciones requeridas dentro del entorno de operaciones para optimizar la eficiencia del proceso constructivo; para prevenir y adelantarse a las fallas de los elementos, componentes, máquinas o equipos; como también hace referencia a diferentes acciones, como cambios o reemplazos, adaptaciones, restauraciones, inspecciones, evaluaciones, etc., realizadas en periodos de tiempos por calendario o uso de estos.

Fases para la aplicación de un plan de Mantenimiento Preventivo

La planificación: (Se especifica las actividades por desarrollar, con qué personal se va a trabajar, equipos y herramientas por utilizar, tiempo aproximado de trabajo).

La programación: (Se define el día, la hora, lugar dónde se van a desarrollar, las actividades previamente planificadas).

La ejecución: (Realización de los trabajos, previamente definidos).

El control: (verificación y validación de los trabajos ejecutados).

2.2.3 Mantenimiento Predictivo

(Sifonte, 2017) En el mantenimiento Predictivo se asocia la relación de parámetros físicos con el desgaste o estado de una máquina, toma en cuenta la medición, el monitoreo de parámetros y las circunstancias de operación de un equipo o máquina

A partir del monitoreo se realizan técnicas para presagiar el punto futuro de falla, anomalía, rotura o avería de un componente de una máquina de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Logrando con este proceso que el tiempo muerto del equipo disminuya y el tiempo de vida del componente por el contrario se prolongue.

En el mantenimiento Predictivo consta de una serie de pruebas de carácter no destructivo que sirven para realizar un seguimiento de operación de los equipos para captar signos de advertencia que indiquen que alguna de sus partes no está trabajando de forma adecuada y podría presentar fallas recurrentes. Los datos más relevantes que entrega este tipo de seguimiento de los equipos es la tendencia de los valores, ya que se puede acceder a los cálculos necesarios para así prever con cierto margen de error cuándo un equipo fallará. Se les nombra técnicas predictivas. Aplicando este tipo de mantenimiento sistemático por horas de funcionamiento o por tiempo avanzado desde la última revisión, el mantenimiento predictivo tiene la ganancia indiscutible de que en la mayoría de las veces no es necesario hacer grandes desmontajes e inclusive en casos específicos ni siquiera es necesario parar la máquina.

Generalmente las técnicas de mantenimiento predictivo son no invasivas. El objetivo primordial es prever el fallo de un componente, pieza, máquina o equipo con la misión de anticiparse a este, el mantenimiento predictivo ofrece una ventaja económica adicional: La compra de repuestos se puede optimizar y realizar exclusivamente cuando son primordialmente necesarias.

Estas aplicaciones predictivas más comunes en mantenimiento de maquinaria pesada para ingeniería vial son las siguientes:

- El análisis de vibraciones mecánicas
- Termografía.
- El análisis de aceites.
- Los análisis por ultrasonidos.
- Análisis por medio de luz ultravioleta.

El ciclo de Deming

Es una metodología de mejora continua que se utiliza para mejorar los procesos y productos también conocido como ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act),

El ciclo de Deming consta de cuatro fases:

Planificación: En esta fase se define el objetivo de la mejora, se analizan los procesos actuales y se desarrollan planes de acción.

Ejecución: En esta fase se implementan los planes de acción definidos en la fase de planificación.

Verificación: En esta fase se verifican los resultados de las acciones implementadas.

Actuación: En esta fase se realizan los ajustes necesarios para consolidar los resultados obtenidos. Es una metodología eficaz para mejorar la calidad, la productividad y la eficiencia.

Implementación del Ciclo Deming

La implementación del ciclo de Deming requiere un compromiso de la alta dirección y de todos los empleados de la organización. El proceso de implementación generalmente se divide en las siguientes etapas:

Sensibilización: En esta etapa se informa a todos los empleados sobre el ciclo de Deming y sus beneficios.

Formación: En esta etapa se capacita a los empleados en el uso del ciclo de Deming.

Implementación: En esta etapa se implementa el ciclo de Deming en los procesos y productos seleccionados.

Seguimiento y mejora: En esta etapa se monitorea el progreso del ciclo de Deming y se realizan los ajustes necesarios.

2.3 Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP)

(Saaty, 2014) Es una metodología de toma de decisiones multicriterio que se utiliza para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios. El AHP se basa en el principio de que la experiencia y el conocimiento de los factores más importantes y los datos utilizados en el proceso. El AHP se puede dividir en los siguientes pasos:

Definición de los objetivos: El primer paso es definir los objetivos de la decisión. Los objetivos deben ser claros, concisos y mutuamente excluyentes.

Identificación de los criterios: El segundo paso es identificar los criterios que se utilizarán para evaluar las alternativas. Los criterios deben ser relevantes para los objetivos y mutuamente excluyentes.

Establecimiento de las relaciones de importancia: El tercer paso es establecer las relaciones de importancia entre los criterios. Esto se hace mediante una matriz de comparación de pares.

Evaluación de las alternativas: El cuarto paso es evaluar las alternativas en función de los criterios. Esto se hace mediante una matriz de comparación de pares.

Cálculo de los pesos de las alternativas: El quinto paso es calcular los pesos de las alternativas. Esto se hace mediante el proceso de descomposición.

Toma de decisión: El sexto paso es tomar una decisión. La decisión se basa en los pesos de las alternativas.

2.3.1 Matriz de comparación de pares

La matriz de comparación de pares es una herramienta que se utiliza para establecer las relaciones de importancia entre los criterios o las alternativas. La matriz es una tabla que tiene un número de filas y columnas igual al número de criterios o alternativas.

En la matriz, cada celda representa la importancia relativa de un criterio o alternativa con respecto a otro. La importancia relativa se expresa en una escala de 1 a

9, donde 1 significa que los dos criterios o alternativas son igualmente importantes y 9 significa que un criterio o alternativa es muy importante en comparación con el otro.

2.3.2 Cálculo de los pesos de las alternativas

Los pesos de las alternativas se calculan mediante el proceso de descomposición. El proceso de descomposición es un algoritmo que se utiliza para calcular los pesos de un conjunto de variables en función de sus relaciones mutuas. El proceso de descomposición se puede dividir en los siguientes pasos:

Suma de las filas: La primera etapa es sumar las filas de la matriz de comparación de pares.

Normalización de las filas: La segunda etapa es normalizar las filas de la matriz de comparación de pares.

Cálculo de los pesos: La tercera etapa es calcular los pesos de las alternativas.

2.3.3 RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad):

(Amendola, 2016) Es una metodología sistemática para la determinación de los requisitos de mantenimiento de un activo. Se basa en el análisis de las funciones que el activo debe realizar y de los modos de falla que pueden impedir que estas funciones se cumplan. Los objetivos del RCM son:

- Maximizar la disponibilidad del activo, es decir, el tiempo que el activo está disponible para realizar su función.
- Minimizar los costos de mantenimiento.
- Minimizar el riesgo de lesiones o daños a las personas, los activos o el medio ambiente.

El RCM se basa en los siguientes principios:

Enfoque basado en funciones: El RCM se centra en las funciones que los equipos deben cumplir, en lugar de en sus componentes.

Enfoque preventivo: El RCM se centra en la prevención de los fallos, en lugar de en la reparación de los mismos.

Enfoque basado en la causa raíz: El RCM se centra en la identificación y eliminación de las causas raíz de los fallos, en lugar de en los síntomas.

Enfoque basado en el riesgo: El RCM tiene en cuenta el riesgo asociado a los fallos, en lugar de centrarse únicamente en la probabilidad de que se produzcan.

Principios del RCM

Análisis de modos y efectos de fallo: Es una herramienta que identifica todos los modos de fallo posibles para un equipo y evalúa sus efectos.

Análisis de la criticidad del fallo: El análisis de la criticidad del fallo es una herramienta que evalúa la importancia de cada modo de fallo.

Análisis de la estrategia de mantenimiento: El análisis de la estrategia de mantenimiento es una herramienta que ayuda a determinar las estrategias de mantenimiento adecuadas para cada modo de fallo

Análisis de causa raíz. Esta herramienta se utiliza para identificar las causas raíz de los modos de falla.

Análisis de árbol de fallas. Esta herramienta se utiliza para representar gráficamente las relaciones entre los modos de falla.

Matriz de criticidad. Esta herramienta se utiliza para evaluar el impacto de los modos de falla en la disponibilidad del activo.

El RCM ofrece una serie de ventajas, entre las que se incluyen:

Mejora de la confiabilidad de los equipos: El RCM ayuda a identificar y eliminar las causas de los fallos, lo que conduce a una mejora de la confiabilidad de los equipos.

Reducción de los costes de mantenimiento: El RCM ayuda a optimizar las estrategias de mantenimiento, lo que puede conducir a una reducción de los costes de mantenimiento.

Mejora de la disponibilidad de los equipos: El RCM ayuda a garantizar que los equipos estén disponibles cuando se necesitan, lo que puede mejorar la productividad.

Las 7 preguntas del RCM se utilizan para analizar los activos y determinar los requisitos de mantenimiento necesarios para garantizar que cumplan sus funciones de forma segura y eficiente.

Las preguntas son las siguientes:

¿Cuál es la función del activo?

¿Cómo puede fallar el activo en su función?

¿Cuáles son los modos de falla del activo?

¿Cuáles son las causas de cada modo de falla?

¿Cuáles son los efectos de cada modo de falla?

¿Cuáles son las consecuencias de cada modo de falla?

¿Qué se puede o debe hacer para prevenir o predecir las fallas?

Las respuestas a estas preguntas se utilizan para determinar la estrategia de mantenimiento más adecuada para cada activo.

2.3.4 La Función Primaria de un Activo

Es la razón por la que el activo existe. Es la función que el activo debe realizar para cumplir con su propósito, se identifica en la primera pregunta del RCM. La respuesta a esta pregunta proporciona una base para el análisis de los modos de falla y la determinación de las estrategias de mantenimiento. La función primaria debe ser clara y concisa, con una declaración que describa la función del activo en términos de su propósito.

La función primaria es importante para el RCM porque proporciona una base para el análisis de los modos de falla. Los modos de falla son formas en que un activo puede dejar de cumplir con su función primaria.

Características de una función primaria:

Debe ser clara y concisa.

Debe ser una declaración que describa la función del activo en términos de su propósito.

Debe ser independiente de los modos de falla.

Debe ser independiente del diseño del activo.

2.3.5 La función secundaria de un activo

Es una función que no es esencial para el funcionamiento del activo, pero que mejora su rendimiento o eficiencia.

Las funciones secundarias se identifican en la tercera pregunta del RCM. La respuesta a esta pregunta proporciona información adicional que puede ser útil para determinar las estrategias de mantenimiento, son importantes para el funcionamiento del activo, pero no son esenciales.

Las funciones secundarias también pueden ser importantes para la seguridad o el medio ambiente. La identificación de las funciones secundarias es importante para el RCM porque proporciona información adicional que puede ser útil para determinar las estrategias de mantenimiento.

Características de una función secundaria:

No es esencial para el funcionamiento del activo.

Mejora el rendimiento o eficiencia del activo.

Puede ser importante para la seguridad o el medio ambiente.

Las Fallas Funcionales

Se identifican en la segunda pregunta del RCM. La respuesta a esta pregunta proporciona una base para el análisis de los modos de falla y la determinación de las estrategias de mantenimiento. Las fallas funcionales pueden ser causadas por una variedad de factores, como desgaste, corrosión, sobrecarga, error humano o condiciones ambientales adversas.

Características de una falla funcional:

Es una condición en la que un activo deja de cumplir con su función primaria o secundaria.

Puede ser causada por una variedad de factores.

Puede tener un impacto significativo en el activo, el sistema o la organización.

Análisis de Fallas Funcionales:

El análisis de fallas funcionales es un proceso que se utiliza para identificar las causas de las fallas funcionales. El análisis se puede realizar utilizando una variedad de técnicas, como análisis de causa raíz, análisis de árbol de fallas y análisis de modos y efectos de fallas.

Una vez que se han identificado las causas de las fallas funcionales, se pueden desarrollar estrategias de mantenimiento para prevenir o mitigar las fallas.

2.3.6 Modo de Falla

(Jardine, 2013) En el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), un modo de falla es una forma en que un activo puede dejar de cumplir con su función.

Los modos de falla se identifican en la tercera pregunta del RCM. La respuesta a esta pregunta proporciona una base para el análisis de las causas de las fallas y la determinación de las estrategias de mantenimiento.

Los modos de falla pueden ser clasificados en dos categorías:

Fallas funcionales: Son fallas que impiden que el activo cumpla con su función primaria o secundaria.

Fallas no funcionales: Son fallas que no impiden que el activo cumpla con su función primaria o secundaria, pero que pueden tener un impacto negativo en el rendimiento, la eficiencia o la seguridad del activo.

Una vez que se han identificado todos los modos de falla posibles, se pueden evaluar para determinar su impacto en la disponibilidad del activo.

Los modos de falla pueden ser clasificados en dos categorías:

Fallas funcionales: Son fallas que impiden que el activo cumpla con su función primaria o secundaria.

Fallas no funcionales: Son fallas que no impiden que el activo cumpla con su función primaria o secundaria, pero que pueden tener un impacto negativo en el rendimiento, la eficiencia o la seguridad del activo.

Características de un modo de falla:

Es una forma en que un activo puede dejar de cumplir con su función.

Puede ser funcional o no funcional.

Puede ser causado por una variedad de factores.

Las consecuencias de falla se identifican en la sexta pregunta del RCM. La respuesta a esta pregunta proporciona información adicional que puede ser útil para determinar las estrategias de mantenimiento.

Las consecuencias de falla se pueden clasificar en cuatro categorías:

Producción: Las consecuencias relacionadas con la producción, como la pérdida de producción, la pérdida de calidad o la pérdida de ventas.

Mantenimiento: Las consecuencias relacionadas con el mantenimiento, como el aumento de los costos de mantenimiento, la pérdida de disponibilidad del activo o la reducción de la confiabilidad del activo.

Seguridad y medio ambiente: Las consecuencias relacionadas con la seguridad y el medio ambiente, como lesiones personales, daños a la propiedad o daños ambientales.

Ocultas: Las consecuencias que no son inmediatamente obvias, como los costos de oportunidad o la pérdida de reputación.

MTBF (Mean Time Between Failures) Es el tiempo medio entre averías de un equipo. Se mide en horas, días, semanas o meses. El MTBF se calcula dividiendo el tiempo total de funcionamiento de un equipo por el número de averías que ha experimentado.

MTBF = Tiempo total de funcionamiento / Número de averías ... ecuación (1)

El MTTR es el tiempo medio que se tarda en reparar un equipo averiado. Se mide en horas, días, semanas o meses. El MTTR se calcula dividiendo el tiempo total de reparación de todos los equipos por el número de equipos averiados.

MTTR = Tiempo total de reparación / Número de equipos averiados ecuación (2)

Disponibilidad

La disponibilidad es una medida de la probabilidad de que un equipo esté disponible para su uso en un momento dado. Se expresa como un porcentaje.

Es una medida importante de la confiabilidad de un equipo. Una alta disponibilidad indica que el equipo es confiable y que está disponible para su uso con frecuencia. Se puede utilizar para una variedad de propósitos, incluyendo:

Evaluar la confiabilidad de los equipos: La disponibilidad se puede utilizar para evaluar la confiabilidad de los equipos. Una alta disponibilidad indica que los equipos son confiables y que es probable que funcionen sin fallas.

Planificar el mantenimiento: La disponibilidad se puede utilizar para planificar el mantenimiento preventivo y predictivo. Una alta disponibilidad indica que es posible reducir la frecuencia del mantenimiento preventivo y predictivo.

Controlar el rendimiento del mantenimiento: Para controlar el rendimiento del mantenimiento. Una alta disponibilidad indica que el mantenimiento está funcionando eficazmente para evitar las fallas.

Para hallar la Disponibilidad Inherente se utiliza:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \dots \text{ecuación (3)}$$

Función de Densidad de Probabilidad

La función de densidad de probabilidad es una función matemática que describe la probabilidad de que un evento ocurra en un intervalo de tiempo determinado. La función de densidad de probabilidad tiene la siguiente forma:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda t} \dots \text{ecuación(4)}$$

f(x) es la función de densidad de probabilidad
 λ es la tasa de ocurrencia del evento
t es el tiempo

Confiabilidad (R):

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \dots \text{ecuación(5)}$$

Distribución Weibull

(Mora, 2009) La distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua que se utiliza para modelar el tiempo hasta el fallo de un componente o sistema. Se caracteriza por tres parámetros:

β : Es el parámetro de forma, que determina la forma de la distribución. Un valor alto de β indica que la distribución es más asimétrica, con una mayor probabilidad de fallos tempranos.

η : Es el parámetro de escala, que determina el tiempo promedio hasta el fallo.

γ : Es el parámetro de localización, que determina el tiempo en el que la distribución tiene una probabilidad de 0,5.

En el contexto del mantenimiento, la distribución de Weibull se puede utilizar para:

Determinar la vida útil esperada de un componente o sistema.

Predecir la probabilidad de fallo de un componente o sistema en un momento determinado.

Optimizar las estrategias de mantenimiento preventivo.

Pasos para graficar la distribución de Weibull:

Recopilar Datos: Se recopilan los datos de falla para el activo que se analiza, tomando en consideración los tiempos exactos de falla para cada equipo.

Ordenar los Datos: Se ordenan los tiempos de falla de menor a mayor, y asigna un rango (del 1 al n) para cada tiempo de falla.

Utilizar la aproximación de Benard para el rango de mediana tomando en consideración la cantidad de fallas n de la siguiente forma:

$$F(t) = \frac{i}{N + i} \quad 20 \leq N \leq 50; F(t) = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad N \leq 20; F(t) = \frac{i}{N} \quad N \geq 50 \dots \text{ecuación(6)}$$

Transformar los Datos: Calcula el logaritmo natural tanto de los tiempos de falla como del logaritmo natural del logaritmo natural negativo de las probabilidades de falla.

$$x = \ln(\text{tiempos de falla}) \dots \text{ecuación(7)} ; y = \ln(-\ln(1 - Fi)) \dots \text{ecuación(8)}$$

Graficar los Datos: Se grafican los datos transformados (x, y) utilizando software estadístico.

Ajustar una Línea: Utilizando la regresión lineal, se ajusta una línea recta a los datos. La pendiente de la línea será el parámetro de forma (β), y la intersección con el eje x te ayudará a encontrar el parámetro de escala (η).

$$\eta = \exp\left(\frac{cte}{\beta}\right) \dots \text{ecuación (9)}$$

Interpretar los Parámetros: Se Utilizan los β y η estimados para comprender el comportamiento de falla del sistema y planificar estrategias de mantenimiento en consecuencia y se realiza la gráfica de la confiabilidad.

$$R = \exp\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}^\beta\right) \dots \text{ecuación (10)}; MTBF = \eta * \Gamma(1 + 1/\beta) \dots \dots \dots \text{ecuación(11)}$$

$$\text{Mantenibilidad } M(T) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots \text{ecuación(12)}$$

$$\text{Tasa de fallas } \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots \text{ecuación(13)}$$

2.4 Marco Conceptual

Falla: Pérdida de la capacidad de la maquinaria pesada de realizar lo requerido.

Disponibilidad: Es una función que permite calcular el porcentaje de tiempo en el cual una máquina o equipo está disponible para cumplir la función para la cual fue construido. No implica necesariamente que esté operando o funcionando, sino que se encuentra en óptimas condiciones de operar

Mantenibilidad: Es la facilidad de realizar tareas de mantenimiento en un equipo o máquina, para así devolver a sus condiciones de operación en el menor tiempo posible utilizando procedimientos definidos.

Incertidumbre: Incapacidad para determinar con precisión cual es el valor verdadero de una cantidad en la recolección de datos.

Pendiente: Inclinación de la rasante del camino a lo largo de su alineamiento.

Cuneta: Zanja poco profunda a lo largo del camino que sirve para coleccionar el agua del camino y transportarla hasta un punto adecuado para eliminarla

Talud: inclinación que abarca desde el borde exterior del acotamiento del camino hasta la parte inferior del relleno. Esta es la superficie que se forma donde se deposita el material para la construcción del camino.

Capítulo III. Hipótesis y Operacionalización de Variables

3.1 Hipótesis

La gestión de mantenimiento basado en RCM permitirá mejorar los indicadores de mantenimiento de la maquinaria pesada utilizadas en las MYPE's especializadas en ingeniería vial

3.2 Variables e Indicadores

Tabla 3.1 Variables e Indicadores

VARIABLES	INDICADORES
VI: Gestión de Mantenimiento basado en RCM	<ul style="list-style-type: none">• Tiempo de paradas correctivas (horas)• Porcentaje de equipos críticos (%)
VD: Indicadores de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none">- Probabilidad de fallo de los equipos críticos (%)- MTTR(h)- MTBF(h/falla)- Disponibilidad (%)- Mantenibilidad (%)- Tasa de falla (falla/h)

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Metodología de la Investigación

4.1 Tipo y diseño de la Investigación

El tipo de investigación tiene un enfoque aplicativo debido a que se basará en RCM aplicada a la gestión de mantenimiento de la maquinaria pesada en ingeniería vial, se utilizará la matriz AHP (Análisis de Procesos Jerárquicos), disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad, cálculo de tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio para reparar (MTTR) y se implantará del análisis de modo y efecto de falla.

El alcance es explicativo porque se evaluarán y analizarán la relación causa efecto entre las variables X: «Gestión de Mantenimiento basado en mantenimiento centrado en confiabilidad» e Y: «Indicadores de mantenimiento»

El diseño de la investigación es experimental porque a partir de un análisis previo se identifican las variables, el equipo crítico y los indicadores de mantenimiento para poder comparar con los parámetros resultantes después de aplicar un plan de gestión de mantenimiento adecuado que permita mejorar la disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad que se pretenden elevar una vez aplicado.

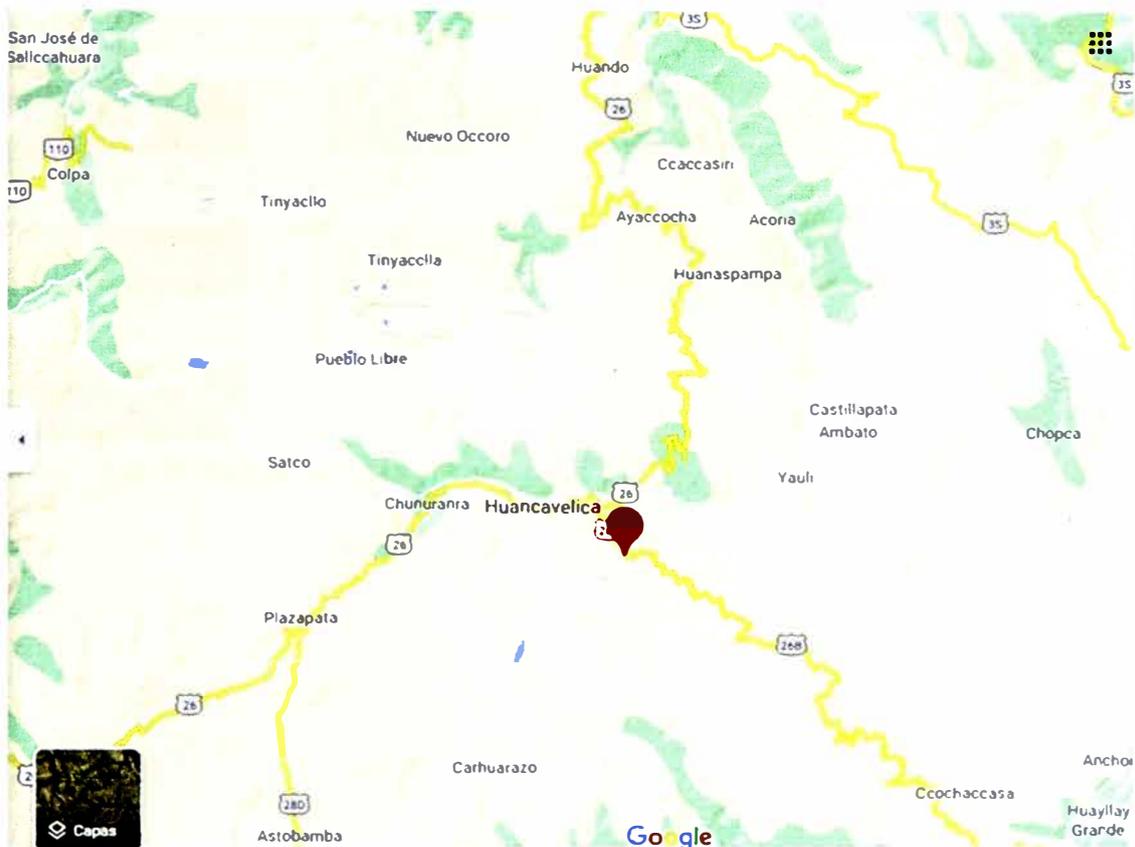
4.2 Unidad de Análisis

En la actualidad el sector construcción y vivienda ha sido uno de los rubros más afectados debido a la situación sanitaria mundial, la imprevista subida de los costos de importación derivaron también en el incremento de los costos de traslado ,operación y mantenimiento de los equipos necesarios para la construcción , las empresas constructoras debido a sus labores utilizan una variedad de maquinaria pesada que necesita una gestión eficaz del mantenimiento para generar una alta confiabilidad y disponibilidad que permitirán un ahorro significativo de recursos y una mejora sustancial de la productividad en los proyectos de construcción y mantenimiento de carreteras .

La investigación se realizó en el ámbito de la ejecución de la obra rehabilitación del camino turístico Sacsamarca-Pueblo libre mirador realizado por CONSORCIO

PROSPECTIVA conformado por 3 MYPE's en la provincia de Huancavelica región Huancavelica a 4300 msnm.

Figura 4.1 Ubicación geográfica del proyecto



Fuente: *Google maps*

El Consorcio especializado en construcción de pavimentos y carreteras cuenta con un pool de maquinarias que consiste en 1 excavadora, 2 volquetes ,1 motoniveladoras ,1 rodillos, 1 camión cisterna que trabajan en conjunto para ejecutar los proyectos que la empresa desarrolla en el país.

El organigrama de la empresa está compuesto por una gerencia general y 3 subgerencias (gerencia de mantenimiento, logística y gerencia de operaciones) y sus respectivas dependencias que en constante coordinación colabora para realizar las obras de ingeniería vial como se observa en la figura 4.2

Figura 4.2 Organigrama de la empresa



Fuente: *Elaboración propia*

4.3 Matriz de Consistencia

Título: "Propuesta de Mantenimiento centrado en Confiabilidad de una Motoniveladora utilizada en el mantenimiento del camino rural Sacsamarca-Pueblo Libre para mejorar su Disponibilidad en una micro y pequeña empresa "

Tabla 4.1 Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿En qué medida una inadecuada gestión de mantenimiento de la maquinaria pesada genera retrasos en los plazos de ejecución de obras viales, sobrecostos y disminución de los indicadores de mantenimiento en las MYPE's especializadas en Ingeniería Vial?	Mejorar la gestión de mantenimiento de la maquinaria pesada utilizadas en las MYPE's especializadas en Ingeniería Vial basado en mantenimiento centrado en confiabilidad.	La gestión de mantenimiento basado en mantenimiento centrado en confiabilidad permitirá mejorar los indicadores de mantenimiento de la maquinaria pesada utilizadas en las MYPE's especializadas en ingeniería vial.	Indicadores de mantenimiento	Gestión de Mantenimiento basado en RCM	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de paradas correctivas (horas) • Porcentaje de equipos críticos (%) • Probabilidad de fallo de los equipos críticos (%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reportes diarios de operación • Manuales de servicio, piezas y mantenimiento del fabricante del equipo.

Fuente: *Elaboración propia*

Capítulo V. Desarrollo del Trabajo de Investigación

Una vez definidos los KPI's utilizados y los pasos a seguir para desarrollar un análisis de confiabilidad, se procedió con el desarrollo del trabajo de investigación, La Figura 5.1 muestra el flujo a seguir.

FASE PRELIMINAR : Se realizó la elección del método a seguir para mejorar la gestión de mantenimiento (RCM, PMO, TPM, Lean Maintenance) para lograr este propósito se utilizó como referencia la matriz AHP basado en la escala de Thomas Saaty, a continuación se determinaron 14 criterios elegidos gracias a la experiencia en campo que al ser comparados entre sí y realizada la matriz normalizada, determinaron el método más apropiado que se aplicó en la empresa considerando las particularidades del análisis como: la condición de micro empresa, equipos utilizados (ver Tabla 5.1) , proceso constructivo (ver Figura 5.2), cantidad de trabajadores (ver figura 4.2) y el entorno de trabajo 4300 msnm.

FASE I: Determinado que el RCM es el método más indicado, se conforma el equipo responsable de implementarlo, tomando en consideración la cantidad de trabajadores y el responsable de mantenimiento, quienes realizaron la toma de datos mediante el formato determinado (ver Anexo 1) en los primeros 6 meses del desarrollo del proyecto y el posterior análisis de los mismos.

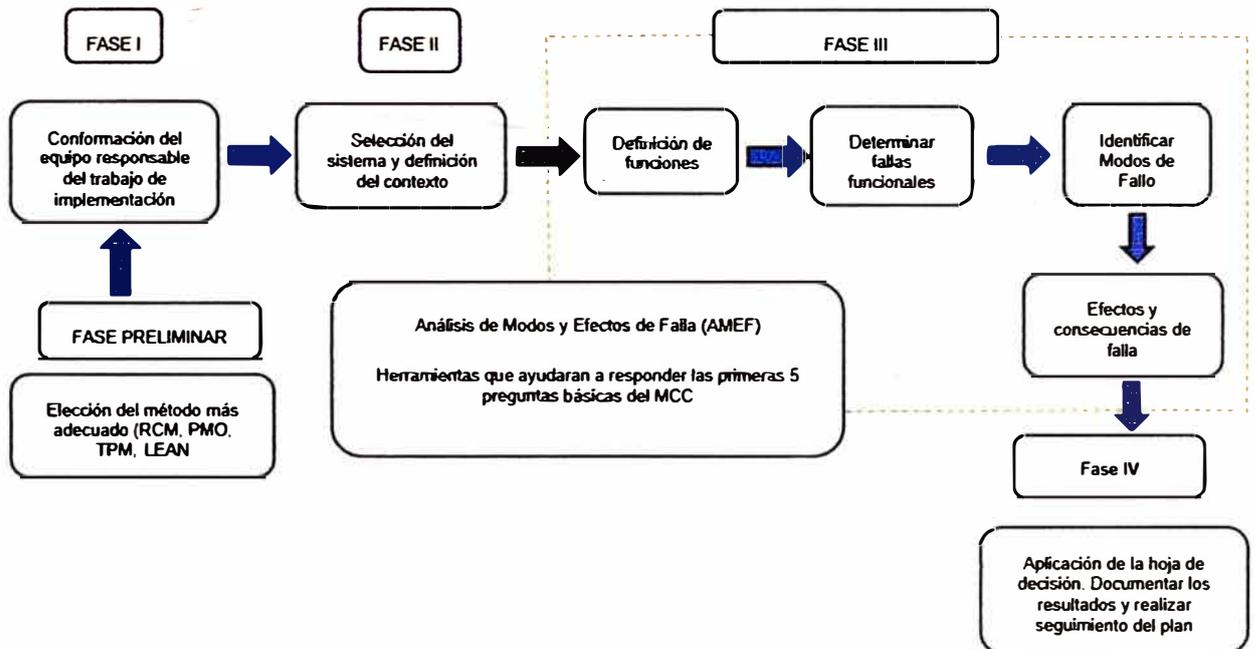
FASE II: A partir de la toma de datos y la observación de la estrategia general de mantenimiento inicial (ver figura 5.3) se realizó un análisis de criticidad que permitió identificar al equipo más crítico del conjunto operativo (ver tabla 5.17), a continuación, se define el contexto operacional de la motoniveladora dentro de los parámetros exigidos por el expediente técnico del proyecto.

FASE III: Se continuó mediante el estudio del AMEF, se definió en primer lugar las funciones primarias y secundarias de la motoniveladora, para continuar con la definición de fallas funcionales, la identificación de los modos de fallo, sus efectos y consecuencias de falla ubicándolos en cuadros para una mejor visualización (ver tabla

5.29) en consecuencia se diseñó el árbol de decisiones (ver figura 5.11) para aplicar el mantenimiento respectivo (correctivo, preventivo, predictivo).

FASE IV: Finalmente se aplicó el árbol de decisiones, se documentaron los resultados para ser comparados en el capítulo 6, de esta forma se definió la validez de la hipótesis y se generaron las conclusiones y recomendaciones respectivas.

Figura 5.1 Flujograma de aplicación RCM a seguir.



Fuente: Elaboración propia

5.1 Fase Preliminar

La empresa cuenta con los siguientes equipos de construcción (ver tabla 5.1) que fueron utilizados de manera regular en el desarrollo del proyecto con la salvedad de poder alquilar otras maquinarias cuyo uso fue puntual y de tiempo limitado.

Listado de Equipos

Tabla 5.1 Listado de Equipos

EQUIPOS	FUNCION	CANTIDAD
MOTONIVELADORA CAT 140K	Se utiliza para nivelar el terreno y eliminar los obstáculos, como rocas de diámetro mayor a 8cm, también compactar el suelo para crear una base firme para el camino con el objetivo de crear una superficie lisa y uniforme de la capa de rodadura.	1
EXCAVADORA CAT 336DL	La excavadora se utiliza para excavar y obtener los agregados que se obtienen de las canteras, excavar las cunetas para drenajes.	1
VOLQUETE VOLVO FMX 440	Se utiliza para el traslado de los agregados.	2
RODILLO CAT CS556	Se utiliza para la compactación del suelo	1
CAMIÓN CISTERNA MERCEDES BENZ AXOR3131/48	Para la mezcla del agua con el organosilano según especificaciones técnicas y su posterior dispersión en el suelo de la carretera.	1

Fuente: Elaboración propia

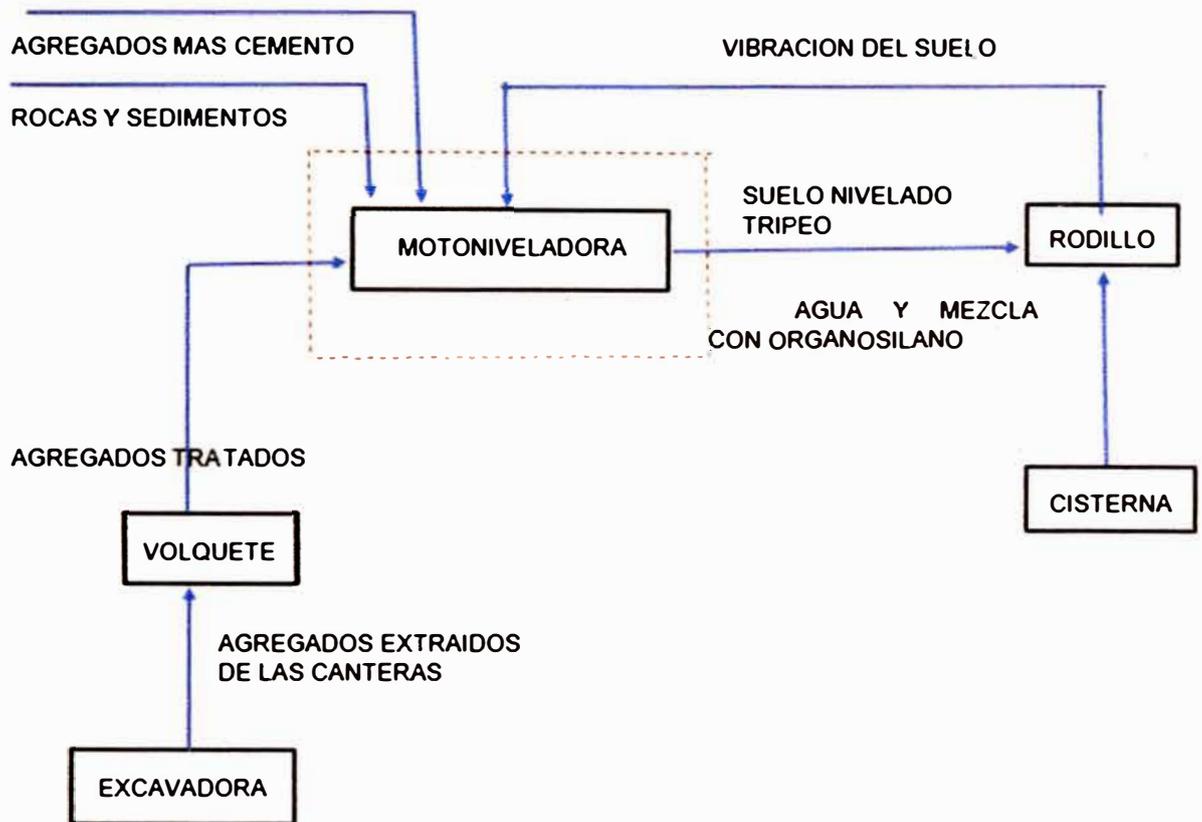
5.1.1 Descripción del Proceso Constructivo

El proyecto consiste en la construcción de una capa de material granular seleccionado, procedente de las 03 canteras seleccionadas este material será recogido mediante la excavadora y trasladado mediante volquetes , se realiza en primer lugar un estabilizado con un sistema diseñado para evitar las filtraciones de lluvia en la carretera con el aditivo químico estabilizador de suelos basado en nanotecnología compuesto por Organosilano más Cemento Portland tipo I como superficie de rodadura de la carretera de acuerdo con las especificaciones técnicas, la dosificación, como de las dimensiones, alineamiento y secciones transversales están indicados en el expediente técnico del proyecto.

El afirmado (material granular estabilizado) se coloca sobre una superficie preparada tratada mediante la motoniveladora el suministro, conformación, escarificado, batido con el estabilizador y compactación del material, en conformidad con los alineamientos, pendientes y dimensiones indicados.

El rodillo compactara la mezcla mediante vibración y se repite el proceso hasta que la superficie quede en las condiciones requeridas especificadas. La figura 5.2 ejemplifica el proceso constructivo especificado en el expediente técnico.

Figura 5.2 Proceso constructivo del mantenimiento de un camino rural



Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Descripción de la Estrategia general de Mantenimiento

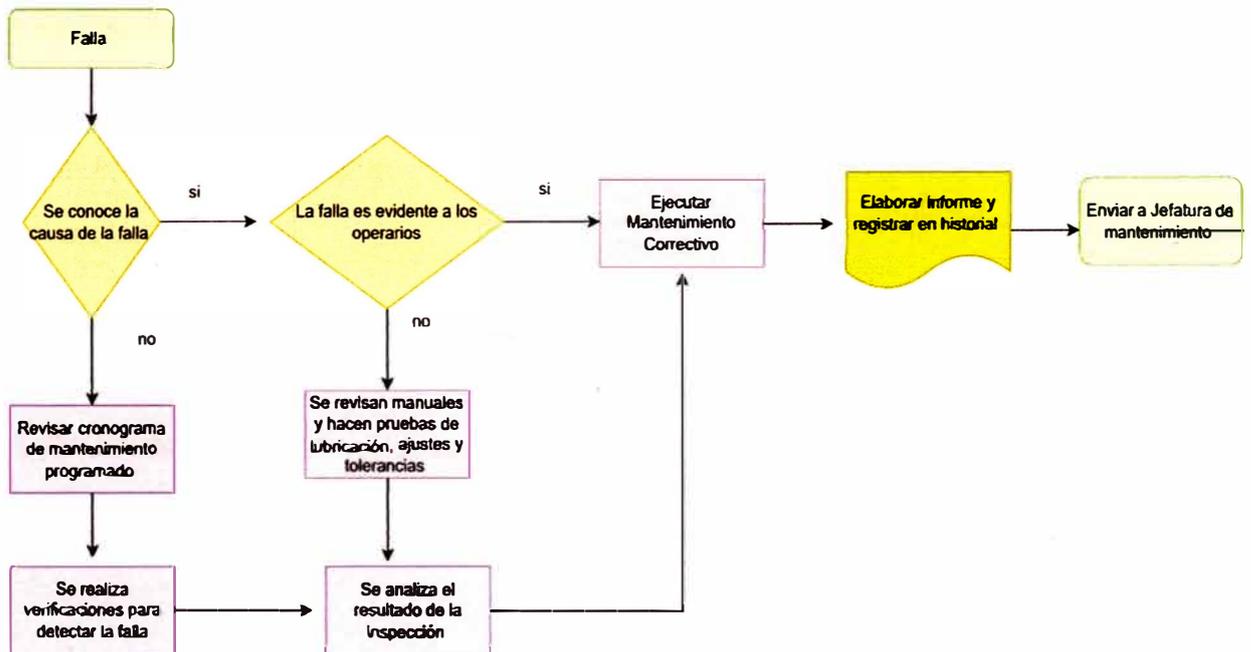
En los primeros 6 meses de la ejecución del proyecto solo se aplicaron mantenimientos correctivos precarios con un manejo del horómetro limitado y se siguieron en la medida de lo posible las recomendaciones del fabricante con respecto a la lubricación y mantenimiento programado utilizando un check list inicial (ver anexo 1).

Personal encargado del mantenimiento se compone de la siguiente manera:

- Bachiller en ingeniería mecánica - eléctrica encargado del mantenimiento, compras, planeamiento.

- técnico en maquinaria pesada – conductores encargados de toma de datos y mantenimiento en general

Figura 5.3 Flujograma de la estrategia de mantenimiento inicial



Fuente: Elaboración Propia

5.1.3 Matriz AHP (Análisis de Procesos Jerárquicos)

Para realizar la selección de la metodología que permita mejorar la gestión de mantenimiento se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para identificar la alternativa más adecuada de solución al problema de las demoras por fallas no programadas y las paradas totales que perjudican el proceso constructivo.

Para realizar la evaluación de los criterios se utilizó la Escala de Thomas Saaty que determinó el criterio con la mayor jerarquía que los demás.

Tabla 5.2 muestra la escala de Thomas Saaty, utilizada para definir la importancia de criterios.

Tabla 5.2 Escala de Thomas Saaty

IMPORTANCIA	DEFINICIÓN
1 Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.
2 Valor intermedio-Débil	Intermedios entre los valores 1 y 3.
3 Valor intermedio-Débil	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
4 Valor intermedio: más moderado	Intermedio entre los valores 3 y 5.
5 Fuerte importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
6 Valor intermedio-Fuerte más	Intermedio entre los valores 5 y 7.
7 Muy fuerte o demostrado	Una actividad es favorecida fuertemente sobre otra; su dominio demostrado en la práctica.
8 Valor intermedio-Muy fuerte	Intermedio entre los valores 7 y 9.
9 Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del orden de afirmación más alto posible.

Fuente: (Saaty, 2014)

Se realizaron los siguientes pasos para la evaluación de la metodología de Proceso Analítico Jerárquico:

El problema se descompone en criterios.

Ponderación de la matriz de criterios.

Normalización de la matriz de criterios.

Comparación de alternativas y decisión de la mejor alternativa.

Evaluación de consistencia de la matriz.

Se definen 14 criterios a evaluarse en la metodología (AHP) como se muestra a continuación.

Tabla 5.3 Criterios AHP

Criterio	Causas del problema
C1	Planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos
C2	Componentes mayores no llegan con el tiempo adecuado
C3	Componentes mayores no llegan correctamente reparados. (Control de calidad)
C4	Gerencia de mantenimiento no ejecuta mantenimiento de calidad.
C5	Falla de equipos constante por problemas mecánicos.
C6	Reprogramación de paradas por falta de componentes mayores
C7	No se tiene claridad sobre las funciones de cada área.
C8	Error de personal por falta de experiencia y capacitación
C9	Personal insuficiente de confiabilidad-predictivo
C10	Inadecuada gestión del mantenimiento
C11	Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal.
C12	Falla de los componentes de desgaste por baja calidad de material
C13	Falla de instrumentos de medición de mantenimiento
C14	Personal desconoce procedimientos adecuados de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

La ponderación de la matriz de criterios consiste en evaluar criterio con criterio para determinar quién tiene una mayor importancia de acuerdo a la escala de Thomas Saaty.

La normalización de la matriz de criterios consiste en sumar los valores de los criterios y se divide cada criterio sobre la suma del total, con la finalidad de tener una matriz normalizada y determinar qué criterios tienen una mayor % sobre los otros criterios.

Evaluamos C1-C1 Obtenemos como resultado 1 debido a que ambos criterios son similares.

C1-C2: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 2 en contraposición con Componentes mayores no llegan con el tiempo adecuado(C2) que se pondera con 1; la ponderación se basa en que debido a la experiencia en campo y los registros se favorece ligeramente al C1 sobre el C2.

C1-C3: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 2 en contraposición con Componentes mayores no llegan correctamente reparados. (Control de calidad) (C3) que se pondera con 1; la ponderación se basa en que debido a la experiencia en campo que determina ambos

criterios como principales razones de la parada de maquina en el desarrollo del proyecto, sin embargo, se favorece ligeramente al C1 sobre el C2.

C1-C4: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 3 en contraposición con Gerencia de mantenimiento no ejecuta mantenimiento de calidad(C4) que se pondera con 1; se pondera de esta forma debido a que ambos criterios influyen de manera similar en el proceso constructivo, la experiencia en campo demuestra que el criterio (C1) es ligeramente más importante que el (C4).

C1-C5: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 1 en contraposición con Falla de equipos constante por problemas mecánicos(C5) que también se pondera con 1; debido a que ambos criterios influyen de la misma manera en el proceso constructivo y mantenimiento de la maquinaria pesada.

C1-C6: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 2 en contraposición con Reprogramación de paradas por falta de componentes mayores (C6) que es 1; debido a que utilizando la experiencia de campo (C1) engloba al criterio (C6) y es ligeramente más influyente en el mantenimiento general.

C1-C7: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 1 en contraposición con No se tiene claridad sobre las funciones de cada área (C7) que es 1, esta ponderación se realiza por que ambos criterios tienen igual impacto en el proceso constructivo, en el caso de las MYPE's y su reducido personal resulto complicado asignar funciones determinadas al personal de la empresa que sean correctamente realizadas, problemas que se solucionan con un mejora de la gestión de mantenimiento.

C1-C8: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 1 en contraposición con Error de personal por falta de experiencia y capacitación (C8) que es 2; esta ponderación se realiza debido al enorme impacto que

tiene en el proceso constructivo las fallas en la operación de la motoniveladora que genera retrasos injustificados en la ejecución de obra.

C1-C9: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos(C1) su ponderación es 1 en contraposición con Personal insuficiente de confiabilidad-predictivo (C9) que es 1; esta ponderación se realiza por que ambos criterios tienen igual impacto en el proceso constructivo y se relacionan directamente.

C1-C10: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos (C1) su ponderación es 1 en contraposición con Inadecuada gestión del mantenimiento (C10) que es 3; debido a que el criterio (C10) engloba al (C1).

C1-C11: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos (C1) su ponderación es 1 en contraposición con Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal (C11) que es 2; debido a que los excesos en la capacidad nominal generan una parada total de la maquinaria que detiene el proceso constructivo.

C1-C12: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos (C1) su ponderación es 2 en contraposición con Falla de los componentes de desgaste por baja calidad de material (C12) que es 1; por que un mantenimiento preventivo puede reducir la falla de los componentes de desgaste por baja calidad de material.

C1-C13: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos (C1) su ponderación es 3 en contraposición con falla de instrumentos de medición de mantenimiento (C13) que es 1; por que un mantenimiento preventivo engloba una correcta calibración de los instrumentos de medición y su adecuado uso.

C1-C14: Los planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos (C1) su ponderación es 1 en contraposición con el Personal desconoce procedimientos adecuados de mantenimiento (C14) que es 1; porque su influencia en el proceso constructivo y de mantenimiento son similares.

De manera similar se procede con los siguientes criterios y se desarrolla en la tabla que presentamos a continuación:

Tabla 5.4 Ponderación de criterios

Paso 1a: PONDERACION	Evaluación de Criterios	Evaluación de Criterios													
		Planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos	Componentes mayores no llegan con el tiempo adecuado	Componentes mayores no llegan correctamente reparados. (Control de calidad)	Gerencia de mantenimiento no ejecuta mantenimiento de calidad.	Falla de equipos constante por problemas mecánicos.	Reprogramación de paradas por falta de componentes mayores	No se tiene claridad sobre las funciones de cada área	Error de personal por falta de experiencia y capacitación	Personal insuficiente de confiabilidad-predictivo	Inadecuada gestión del mantenimiento	Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal.	Falla de los componentes de desgaste por baja calidad de material	Falla de instrumentos de medición de mantenimiento	Personal desconoce procedimientos adecuados de mantenimiento
Evaluación de Criterios	CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos	C1	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	0.5	1.0	3.0	0.5	2.0	3.0	1.0
Componentes mayores no llegan con el tiempo adecuado	C2	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	0.3	1.0	2.0	1.0
Componentes mayores no llegan correctamente reparados (Control de calidad)	C3	0.5	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3	2.0	1.0	2.0	0.5
Gerencia de mantenimiento no ejecuta mantenimiento de calidad	C4	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	0.5	2.0	0.3	2.0	1.0	1.0	0.3
Falla de equipos constante por problemas mecánicos	C5	1.0	1.0	3.0	3.0	1.0	1.0	3.0	3.0	0.5	1.0	2.0	3.0	3.0	1.0
Reprogramación de paradas por falta de componentes mayores	C6	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	0.3	1.0	1.0	1.0
No se tiene claridad sobre las funciones de cada área	C7	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	1.0	2.0	0.3	0.3	1.0	1.0	3.0
Error de personal por falta de experiencia y capacitación	C8	2.0	1.0	1.0	2.0	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	3.0	1.0
Personal insuficiente de confiabilidad-predictivo	C9	1.0	0.3	3.0	0.5	2.0	0.3	0.5	3.0	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0	1.0
Inadecuada gestión del mantenimiento	C10	0.3	1.0	3.0	3.0	1.0	1.0	3.0	1.0	1.0	1.0	0.3	3.0	3.0	1.0
Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal	C11	2.0	3.0	0.5	0.5	0.5	3.0	3.0	3.0	1.0	3.0	1.0	3.0	3.0	3.0
Falla de los componentes de desgaste por baja calidad de material	C12	0.5	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0
Falla de instrumentos de medición de mantenimiento	C13	0.3	0.5	0.5	1.0	0.3	1.0	1.0	0.3	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	0.5
Personal desconoce procedimientos adecuados de mantenimiento	C14	1.0	1.0	2.0	4.0	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	2.0	1.0
TOTAL		12.0	15.8	21.0	23.0	10.5	16.3	18.8	18.3	16.8	14.7	23.0	29.0	16.3	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.5 Normalización de la matriz de criterios.

Paso 1b: NORMALIZACION																
Evaluación de Criterios	Planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos	Componentes mayores no llegan con el tiempo adecuado	Componentes mayores no llegan correctamente reparados. (Control de calidad)	Gerencia de mantenimiento no ejecuta mantenimiento de calidad	Falla de equipos constante por problemas mecánicos.	Reprogramación de paradas por falta de componentes mayores	No se tiene claridad sobre las funciones de cada área.	Error de personal por falta de experiencia y capacitación	Personal insuficiente de contabilidad-predictivo	Inadecuada gestión del mantenimiento	Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal.	Falta de los componentes de desgaste por baja calidad de material	Falta de instrumentos de medición de mantenimiento	Personal desconoce procedimientos adecuados de mantenimiento		
CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	PESO DEL CRITERIO	
Planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos	C1	0.083	0.126	0.095	0.130	0.095	0.122	0.053	0.027	0.059	0.205	0.045	0.087	0.103	0.062	0.09
Componentes mayores no llegan con el tiempo adecuado	C2	0.042	0.063	0.048	0.043	0.095	0.061	0.053	0.055	0.178	0.068	0.030	0.043	0.069	0.062	0.07
Componentes mayores no llegan correctamente reparados (Control de calidad)	C3	0.042	0.063	0.048	0.043	0.032	0.061	0.053	0.055	0.020	0.023	0.180	0.043	0.069	0.031	0.05
Gerencia de mantenimiento no ejecuta mantenimiento de calidad	C4	0.028	0.063	0.048	0.043	0.032	0.061	0.053	0.027	0.119	0.023	0.180	0.043	0.034	0.015	0.06
Falla de equipos constante por problemas mecánicos	C5	0.083	0.063	0.143	0.130	0.095	0.061	0.159	0.164	0.030	0.068	0.180	0.130	0.103	0.062	0.11
Reprogramación de paradas por falta de componentes mayores	C6	0.042	0.063	0.048	0.043	0.095	0.061	0.053	0.055	0.178	0.068	0.030	0.043	0.034	0.062	0.06
No se tiene claridad sobre las funciones de cada área	C7	0.083	0.063	0.048	0.043	0.032	0.061	0.053	0.055	0.119	0.023	0.030	0.043	0.034	0.185	0.06
Error de personal por falta de experiencia y capacitación	C8	0.167	0.063	0.048	0.087	0.032	0.061	0.053	0.055	0.020	0.068	0.030	0.043	0.103	0.062	0.06
Personal insuficiente de contabilidad-predictivo	C9	0.083	0.021	0.143	0.022	0.190	0.020	0.027	0.164	0.059	0.068	0.090	0.130	0.103	0.062	0.08
Inadecuada gestión del mantenimiento	C10	0.028	0.063	0.143	0.130	0.095	0.061	0.159	0.055	0.059	0.068	0.023	0.130	0.103	0.062	0.08
Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal	C11	0.167	0.189	0.024	0.022	0.048	0.184	0.159	0.164	0.059	0.205	0.090	0.130	0.103	0.185	0.12
Falta de los componentes de desgaste por baja calidad de material	C12	0.042	0.063	0.048	0.043	0.032	0.061	0.053	0.055	0.020	0.023	0.030	0.043	0.034	0.062	0.04
Falta de instrumentos de medición de mantenimiento	C13	0.028	0.032	0.024	0.043	0.032	0.061	0.053	0.018	0.020	0.023	0.030	0.043	0.034	0.031	0.03
Personal desconoce procedimientos adecuados de mantenimiento	C14	0.083	0.063	0.095	0.174	0.095	0.061	0.018	0.055	0.059	0.068	0.030	0.043	0.069	0.062	0.07
TOTAL		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.000	1.000	1.000	1

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Comparación de alternativas

De acuerdo a la normalización de la matriz de criterios, se analizan los pesos más altos de cada criterio, se utilizan los criterios C1, C5 y C11. (Ver Tabla 5.5).

Se procedieron a comparar las alternativas de metodologías de gestión de mantenimiento para los criterios de mayor porcentaje y obtener una ponderación de cada alternativa.

Criterio 1: Planes de mantenimiento preventivo no están siendo efectivos

Tabla 5.6 Comparación de alternativas – Criterio C1

C1	PLANES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO NO ESTÁN SIENDO EFECTIVOS									
ALTERNATIVAS	RCM	PMO	TPM	LEAN MAINTENANCE	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO	VECTOR
RCM	1	3	5	9	0.608	0.691	0.417	0.500	0.554	2.405
PMO	0.3	1	5	7	0.203	0.230	0.417	0.389	0.310	1.296
TPM	0.2	0.2	1	1	0.122	0.046	0.083	0.056	0.077	0.309
LEAN MAINTENANCE	0.1	0.1	1	1	0.068	0.033	0.083	0.056	0.060	0.242
TOTAL	1.6	4.3	12.0	18.0	1	1	1	1	1	4.252

Fuente: Elaboración Propia

Criterio 5: Falla de equipos constante por problemas eléctricos.

Tabla 5.7 Comparación de alternativas – Criterio C5

C5	FALLA DE EQUIPOS CONSTANTE POR PROBLEMAS MECANICOS									
ALTERNATIVAS	RCM	PMO	TPM	LEAN MAINTENANCE	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO	VECTOR
RCM	1	3	5	5	0.577	0.682	0.417	0.417	0.523	2.193
PMO	0.3	1	5	5	0.192	0.227	0.417	0.417	0.313	1.334
TPM	0.2	0.2	1	1	0.115	0.045	0.083	0.083	0.082	0.345
LEAN MAINTENANCE	0.2	0.2	1	1	0.115	0.045	0.083	0.083	0.082	0.345
TOTAL	1.7	4.4	12.0	12.0	1	1	1	1	1	4.216

Fuente: Elaboración Propia

Criterio 11: Fallas de los equipos por excesos de capacidad nominal

Tabla 5.8 Comparación de alternativas – Criterio C11

C11	FALLAS DE LOS EQUIPOS POR EXCESOS DE CAPACIDAD NOMINAL									
ALTERNATIVAS	RCM	PMO	TPM	LEAN MAINTENANCE	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO	VECTOR
RCM	1	3	5	7	0.597	0.583	0.625	0.438	0.561	2.332
PMO	0.3	1	1	7	0.199	0.194	0.125	0.438	0.239	1.028
TPM	0.2	1.0	1	1	0.119	0.194	0.125	0.063	0.125	0.532
LEAN MAINTENANCE	0.1	0.1	1	1	0.085	0.028	0.125	0.063	0.075	0.298
TOTAL	1.7	5.1	8.0	16.0	1	1	1	1	1	4.190

Fuente: Elaboración Propia

Comparación y decisión de la mejor alternativa

La mejor alternativa será la que contenga el mayor % de ponderación en todos los criterios. En la Tabla se puede observar que la metodología RCM tiene un mayor % de ponderación para el problema de fallas no programadas, por lo que es la más adecuada, siguiendo los pasos de la metodología Proceso Analítico Jerárquico de Thomas Saaty.

Tabla 5.9 Selección de alternativas Modelo Proceso Analítico Jerárquico

METODOLOGÍA	C1	C5	C11	TOTAL
RCM	0.5539	0.5230	0.5606	0.1755
PMO	0.3096	0.3132	0.2390	0.0911
TPM	0.0766	0.0819	0.1253	0.0312
LEAN MAINTENANCE	0.0598	0.0819	0.0751	0.0234
PESO DEL CRITERIO	0.092	0.105	0.123	

Fuente: Elaboración Propia

Evaluación de consistencia

Se realizó el análisis de consistencia de acuerdo a lo que define la metodología AHP. Si el nivel de inconsistencia es menor a $10\% = 0.1$ el nivel de inconsistencia de la matriz es aceptable.

En las tablas 9, 10 y 11, se muestra la evaluación de consistencia para el criterio 1, 5 y 11, respectivamente:

Evaluación de Consistencia del Criterio – C1:

Tabla 5.10 Evaluación de consistencia – Criterio 1

C1	PLANES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO NO ESTÁN SIENDO EFECTIVOS									
ALTERNATIVAS	RCM	PMO	TPM	LEAN MAINTENANCE	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO	VECTOR
RCM	1	3	5	9	0.608	0.691	0.417	0.500	0.554	2.405
PMO	0.3	1	5	7	0.203	0.230	0.417	0.389	0.310	1.296
TPM	0.2	0.2	1	1	0.122	0.046	0.083	0.056	0.077	0.309
LEAN MAINTENANCE	0.1	0.1	1	1	0.068	0.033	0.083	0.056	0.060	0.242
TOTAL	1.6	4.3	12.0	18.0	1	1	1	1	1	4.252

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando las fórmulas de Consistencia:

$$\text{Indice de Consistencia (IC)} = (\lambda \text{ max} - n) / (n - 1)$$

$$IC = (4.252 - 4) / (4 - 1) = 0.084$$

$$\text{Indice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98 (n - 2)}{n}$$

$$\text{Indice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98 (4 - 2)}{4} = 0.99$$

$$\text{Relación de Consistencia} = \frac{IC}{IA}$$

$$\text{Relación de Consistencia (RC)} = \frac{0.084}{0.99} = 0.0848$$

La relación de consistencia (RC) es 0.0848 < 0.1, por lo tanto, el nivel de consistencia de la matriz es aceptable.

Evaluación de Consistencia del Criterio – C5:

Tabla 5.11 Evaluación de consistencia – Criterio 5

C5	FALLA DE EQUIPOS CONSTANTE POR PROBLEMAS MECANICOS									
ALTERNATIVAS	RCM	PMO	TPM	LEAN MAINTENANCE	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO	VECTOR
RCM	1	3	5	5	0.577	0.682	0.417	0.417	0.523	2.193
PMO	0.3	1	5	5	0.192	0.227	0.417	0.417	0.313	1.334
TPM	0.2	0.2	1	1	0.115	0.045	0.083	0.083	0.082	0.345
LEAN MAINTENANCE	0.2	0.2	1	1	0.115	0.045	0.083	0.083	0.082	0.345
TOTAL	1.7	4.4	12.0	12.0	1	1	1	1	1	4.216

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando las fórmulas de Consistencia:

$$\text{Indice de Consistencia (IC)} = (\lambda \max - n) / (n - 1)$$

$$IC = (4.216 - 4) / (4 - 1) = 0.072$$

$$\text{Indice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(n - 2)}{n}$$

$$\text{Indice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(4 - 2)}{4} = 0.99$$

$$\text{Relación de Consistencia} = \frac{IC}{IA}$$

$$\text{Relación de Consistencia (RC)} = \frac{0.072}{0.99} = 0.073$$

La relación de consistencia (RC) es $0.073 < 0.1$, por lo tanto, el nivel de consistencia de la matriz es aceptable.

Evaluación de Consistencia del Criterio – C11:

Tabla 5.12 Evaluación de consistencia – Criterio 11

C11	FALLAS DE LOS EQUIPOS POR EXCESOS DE CAPACIDAD NOMINAL									
ALTERNATIVAS	RCM	PMO	TPM	LEAN MAINTENANCE	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO	VECTOR
RCM	1	3	5	7	0.597	0.583	0.625	0.438	0.561	2.332
PMO	0.3	1	1	7	0.199	0.194	0.125	0.438	0.239	1.028
TPM	0.2	1.0	1	1	0.119	0.194	0.125	0.063	0.125	0.532
LEAN MAINTENANCE	0.1	0.1	1	1	0.085	0.028	0.125	0.063	0.075	0.298
TOTAL	1.7	5.1	8.0	16.0	1	1	1	1	1	4.190

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando las fórmulas de Consistencia:

$$\text{Indice de Consistencia (IC)} = (\lambda \max - n) / (n - 1)$$

$$IC = (4.190 - 4) / (4 - 1) = 0.063$$

$$\text{Indice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98(n - 2)}{n}$$

$$\text{Indice Aleatorio (IA)} = \frac{1.98 (4 - 2)}{4} = 0.99$$

$$\text{Relación de Consistencia} = \frac{IC}{IA}$$

$$\text{Relación de Consistencia (RC)} = \frac{0.063}{0.99} = 0.0639$$

La relación de consistencia (RC) es $0.064 < 0.1$, por lo tanto, el nivel de consistencia de la matriz es aceptable.

Por tanto, se concluye que la metodología RCM es la más adecuada para mejorar la gestión de mantenimiento de la maquinaria pesada.

5.2 Fase I

Para desarrollar el análisis RCM y mejorar la gestión de mantenimiento, los responsables fueron:

Los técnicos (02) de mantenimiento responsables de la toma de datos y aplicación del mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

El ingeniero responsable del planeamiento, pedido de repuestos y aplicación del RCM, que evaluó el desempeño del proceso.

El encargado de logística responsable de las compras.

Ingeniero Residente responsable de la ejecución de la obra y plazos en la ejecución del proyecto.

Gerencia general responsable del seguimiento y aplicación del RCM verificación de los costos y presupuestos de su implementación.

5.3 Fase II

Asignadas las responsabilidades de cada uno de los miembros responsables de la implementación del RCM se continuo con la ubicación del equipo más crítico del pool de maquinarias tomando en consideración la cantidad de fallas de los 6 primeros meses del desarrollo del proyecto y los criterios de criticidad especificados en la tabla 5.13

Se continuó con la definición del contexto de operación ver tabla 5.18 y el cálculo de los KPI's iniciales con las 1152 h de trabajo programado.

5.3.1 Criticidad

Se aplicaron los criterios de criticidad (ver tabla 5.13) para el conjunto de maquinaria pesada de la empresa tomando en consideración los equipos disponibles ver tabla 5.1

Tabla 5.13 Criterios de criticidad

CRITERIO	PESO
Impacto al proceso constructivo	4
Ocurrencia de falla	3
Costos de mantenimiento	2
Impacto en la seguridad y salud	4
Impacto al medio ambiente	4
Impacto a la mantenibilidad	3

Fuente: Elaboración Propia

Se calcula el Factor de criticidad según la fórmula siguiente:

Factor de criticidad = peso IC * IC + peso OF*OF + peso CM*CM + peso ISS*ISS + peso IMA*IMA + peso IM*IM

Factor de criticidad = 4*IC + 3*OF + 2*CM + 4*ISS + 4*IMA + 3*IM
--

Dónde:

- IC: Impacto al proceso constructivo
- OF: Ocurrencia de falla
- CM: Costos de mantenimiento
- ISS: Impacto a la seguridad y salud
- IMA: Impacto al medio ambiente
- IM: Impacto a la mantenibilidad



Representan los valores de las puntuaciones de los criterios de evaluación.

Se pondera la criticidad en niveles (Muy alta, alta, medio, bajo)

Tabla 5.14 Ponderación de la criticidad

CRITICIDAD	NIVEL	MÍNIMO	MÁXIMO
A	MUY ALTA	59	80
B	ALTA	39	58
C	MEDIO	19	38
D	BAJO	0	18

Fuente: Elaboración Propia

Se definen los niveles de criticidad

Tabla 5.15 Nivel de criticidad

NIVEL DE CRITICIDAD	ACCIÓN
MUY ALTA	Equipo altamente crítico, capaz de causar daños graves en caso de falla, con una alta probabilidad de ocurrencia. Se deben tomar todas las precauciones para evitar que se produzcan daños en este activo y se debe considerar seriamente la posibilidad de tener piezas de repuesto (si es práctico) para este activo.
ALTA	Un componente crítico de equipo, capaz de causar un daño mayor en caso de falla. Se deben tomar todas las precauciones para evitar que se produzcan daños en este activo y se debe considerar seriamente la posibilidad de tener piezas de repuesto (si es práctico) para este activo.
MEDIO	Una pieza importante del equipo, con el potencial de causar daños en caso de falla. El activo se debe mantener regularmente para tratar de evitar fallas; se debe considerar la posibilidad de tener piezas de repuesto para este activo.
BAJO	Es poco probable que cause un daño duradero en caso de falla, los activos deben mantenerse según sea necesario. Solo se deben considerar los repuestos dependiendo del número de activos similares en el sitio.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.16 Matriz de asignación de puntajes según el nivel de impacto

NIVEL DE IMPACTO	PUNTAJE (VALOR)	IMPACTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO (IC)	OCURRENCIA FALLA (OF)	COSTOS DE MANTENIMIENTO (CM)	IMPACTO EN LA SEGURIDAD Y SALUD (ISS)	IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE (IMA)	IMPACTO EN LA MANTENIBILIDAD (IM)
MUY ALTA	4	Se detiene hasta el 100% el proceso constructivo.	Se han presentado más de 20 eventos de falla por año.	Los costos de mantenimiento anual superaron los \$ 20 000.	Enfermedades o incidente que causan la muerte de varias personas	Emergencia ambiental (probable paralización de obra)	El equipo es separado fuera de la obra (3 días a más).
ALTA	3	Se reduce el 50% de la capacidad de avance de obra.	Se han presentado de 15 a 19 eventos de falla por año.	Los costos de mantenimiento anual son mayores a \$ 15 000 hasta \$ 20 000.	Una fatalidad, estado vegetal, invalidez total del cuerpo.	Cualquier tipo de derrame con daño al medio receptor fuera de la zona de trabajo y su remediación y/o limpieza requiere de apoyo especializado externo.	El tiempo medio para reparar es más de 12 horas a 3 días.
MEDIO	2	Se reduce desde el 30% de la capacidad de avance de obra.	Se han presentado de 10 a 14 eventos de falla por año.	Los costos de mantenimiento anual son mayores a \$ 10 000 hasta \$ 15 000.	Lesiones que incapacitan a la persona para su actividad normal de por vida. Enfermedades ocupacionales irreversibles o masivas (intoxicación por el organosilano)	Cualquier tipo de derrame con daño al medio receptor fuera de la zona de trabajo y su remediación y/o limpieza se extiende a más de 1 día con el Equipo de Respuesta a Emergencia de la empresa	El tiempo medio para reparar es más de 6 horas a 12 horas.
BAJA	1	Se reduce desde el 10% de la capacidad de avance de obra.	Se han presentado de 1 a 9 eventos de falla por año.	Los costos de mantenimiento anual son mayores a \$ 5 000 hasta \$ 10 000.	Lesiones/enfermedades que incapacitan a la persona temporalmente.	Cualquier tipo de derrame con daño al medio receptor fuera de la zona de trabajo y su remediación y/o limpieza se extiende a 1 o 2 días con personal de respuesta perteneciente a la empresa.	El tiempo medio para reparar es más de 2 horas a 6 horas.
MUY BAJO	0	Se reduce menos del 10% de la capacidad de avance de obra	No se han presentado eventos de falla.	Los costos de mantenimiento anual son inferiores a \$ 50 000.	Lesiones/enfermedades que luego de una evaluación médica (primeros auxilios y/o tratamiento médico) genera o pueda generar un descanso breve con retorno máximo al día siguiente a sus labores habituales.	Cualquier tipo de derrame con impacto al medio receptor dentro de la zona de trabajo y es limpiado/remediado de manera inmediata.	El tiempo medio para reparar es menos de 2 horas.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.17 Criticidad de los equipos

NOMBRE DEL EQUIPO	IC: Impacto al proceso constructivo	VALOR 1	OF: Ocurrencia de falla	VALOR 2	CM: Costos de mantenimiento	VALOR 3	ISS: Impacto a la seguridad y salud	VALOR 4	IMA: Impacto al medio ambiente	VALOR 5	IM: Impacto a la mantenibilidad	VALOR 6	FACTOR DE CRITICIDAD	NIVEL DE CRITICIDAD	CRITICIDAD
MOTONIVELADORA	MUY ALTA	4	ALTA	3	ALTA	3	MEDIA	2	BAJA	1	ALTA	3	52	ALTA	B
EXCAVADORA	ALTA	3	MEDIA	2	ALTA	3	MEDIA	2	BAJA	1	MEDIA	2	42	ALTA	B
VOLQUETE	ALTA	3	BAJA	2	MEDIA	2	ALTA	3	BAJA	1	MEDIA	2	44	ALTA	B
RODILLO	MEDIA	2	MEDIA	2	ALTA	3	ALTA	3	MEDIA	2	MEDIA	2	46	ALTA	B
CAMION CISTERNA	MEDIA	2	MEDIA	2	MEDIA	2	ALTA	3	BAJA	1	BAJA	1	37	MEDIO	C

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando los niveles de criticidad (ver tabla 5.17) la motoniveladora es el equipo más crítico del pool de maquinarias de la empresa con un factor de criticidad de 52 por lo tanto es el equipo que se analizó y se le aplico el RCM.

5.3.2 Cálculo de KPI's iniciales de la motoniveladora

Se calcula los KPI's de mantenimiento tomando en consideración las 1152 horas de tiempo programado de trabajo utilizando los datos recabados en el anexo aplicando las fórmulas correspondientes:

Tabla 5.18 KPI's Iniciales

ORDINAL	HORÓMETRO	TTR	TBF	SUBSISTEMA
1	20	5	20	HOJA
2	31	18	11	HIDRAULICO
3	59	14	28	MOTOR
4	80	4	21	ELECTRICO
5	93	8	13	TREN
6	121	19	28	
7	146	15	25	
8	178	6	32	
9	204	20	26	
10	271	10	67	
11	307	6	36	
12	369	25	62	
13	417	16	48	
14	483	5	66	
15	535	9	52	
16	599	15	64	
17	656	26	57	
18	693	3	37	
19	709	5	16	
20	741	13	32	
21	795	4	54	
22	834	19	39	
23	887	18	53	
24	912	10	25	
25	938	3	26	
26	978	14	40	
27	1000	23	22	
28	1040	13	40	
29	1064	5	24	
30	1089	17	25	
31	1118	15	29	
32	1140	5	22	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.19 STTR inicial

	SUB SISTEMA	STTR	TOTAL FALLAS	MTTR	MTBF	TASA DE FALLAS 1/MTBF	INDISPONIBILIDAD
1	HOJA	41	9	4.56	128.00	0.0078	3.56%
2	SIST. HIDRAULICO	91	6	15.17	192.00	0.0052	7.90%
3	MOTOR	116	7	16.57	164.57	0.0061	10.07%
4	SIST. ELECTRICO	47	6	7.83	192.00	0.0052	4.08%
5	TREN DE F.	93	4	23.25	288.00	0.0035	8.07%
		388	32	13.48		0.0056	7.49%

Fuente: Elaboración propia

En el subsistema hoja de la motoniveladora existieron 9 fallas con un tiempo de parada de 41 horas

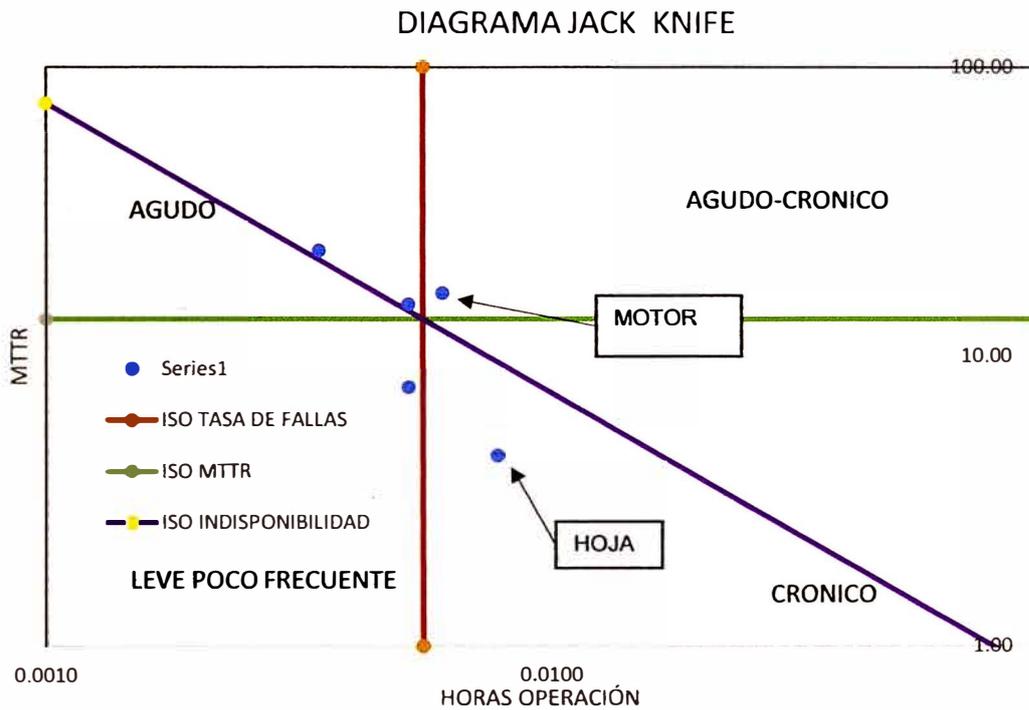
- El MTTR se halló mediante la ecuación 2 se determinó en 4.56 horas
- El MTBF mediante ecuación 1 se determinó en 128 h/ falla
- La tasa de fallas inversa del MTBF es 0.0078
- La indisponibilidad se calcula mediante la multiplicación del MTTR y la tasa de fallas, resultado 3.56%

De manera similar para los otros subsistemas

En la gráfica 5.4 se toman los promedios del MTTR, tasa de fallas e indisponibilidad de los subsistemas para poder determinar los cuadrantes (agudo-crónico, agudo, leve poco frecuente y crónico) y se ubican los subsistemas.

Mediante la utilización del diagrama de Jack Knife se determinaron los subsistemas crónicos(hoja), agudo-crónico (motor) que fueron priorizados en el desarrollo del nuevo plan de mantenimiento para la motoniveladora tomando como referencia la tabla 5.19.

Figura 5.4 Diagrama de Jack Knife



Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Diagrama Nelson Allen

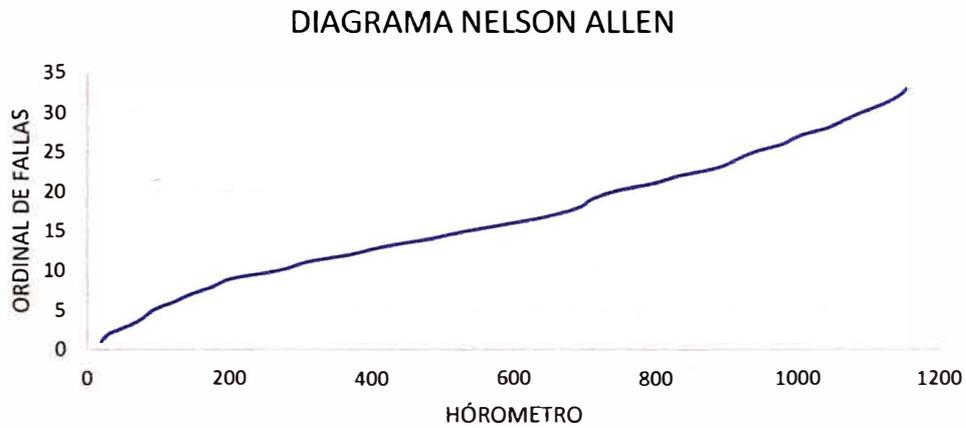
(Jardine, 2013) En el libro el autor recomienda identificar la tendencia del TBF mediante el diagrama de Nelson Allen, para poder identificar la distribución de probabilidad más adecuada que permita lograr resultados más exactos en el análisis de la confiabilidad y mantenibilidad, se observó:

En el diagrama de Nelson Allen (figura 5.5) se ubican en el eje de las abscisas las horas de operación (según horómetro) a las cuales se presentaron las fallas en la motoniveladora tomando como referencia la tabla 5.18 y en el eje de las ordenadas el número de fallas.

De la figura 5.5 se concluye que el sistema es neutro por que no existe tendencia, el TBF es irregular no aumenta ni disminuye a lo largo de las horas de operación de la motoniveladora.

Se concluyó que la distribución de probabilidad Weibull es la que mejor se adecua al análisis de confiabilidad y mantenibilidad.

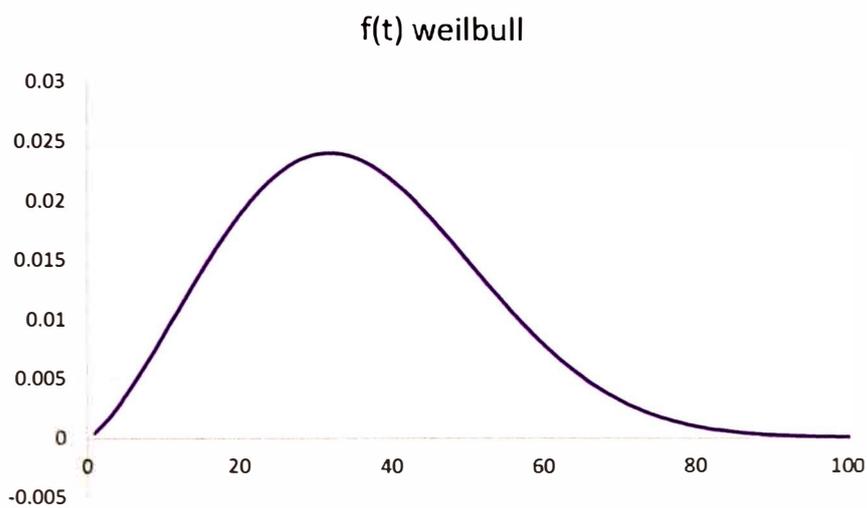
Figura 5.5 Diagrama de Nelson Allen



Fuente: Elaboración propia

La distribución de probabilidad de Weibull se utiliza para representar la probabilidad de que la motoniveladora falle en un momento dado.

Figura 5.6 Distribución de Probabilidad Weibull



Fuente: Elaboración propia

5.3.4 Cálculo del MTBF y Confiabilidad

Se calculó la confiabilidad de la motoniveladora tomando en consideración el histórico de fallas según horómetro a los sistemas reparables y aplicando el método estadístico de Weibull de 2 parámetros debido a que no se cuenta con los datos suspendidos, $\gamma=0$.

Se agruparon el total de fallas de los 5 subsistemas (ver tabla 5.20) y se indican las horas de operación en que sucedieron las fallas a analizar.

Se tomó en consideración la cantidad de fallas ocurridas en los primeros 6 meses de operación (ordinal=32) según la ecuación (6) se hallan los RM (rango de mediana).

Se calculó el logaritmo natural tanto de los tiempos de falla como del logaritmo natural del logaritmo natural negativo de las probabilidades de falla según ecuación 7 y 8 como se observa en la tabla 5.20

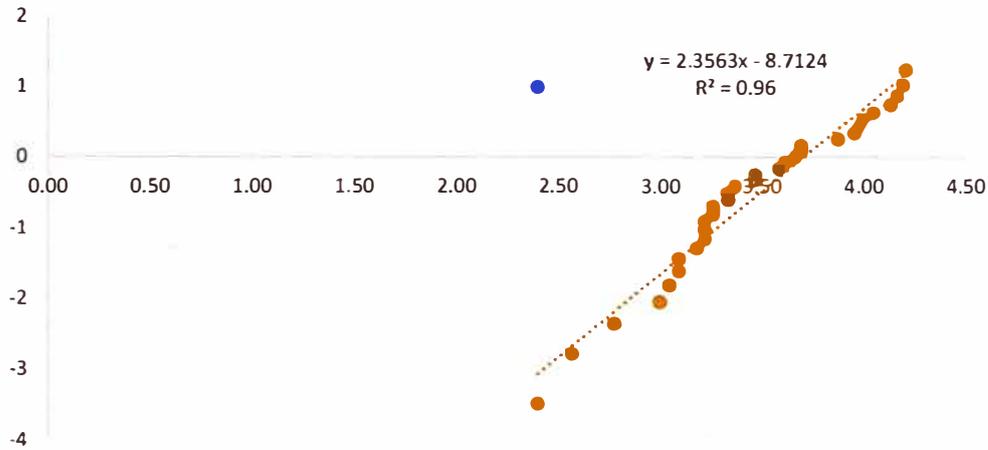
Tabla 5.20 Parámetros de la confiabilidad

ORDINAL	HÓROMETRO	RM	Lt I	Lt-Lt R
1	11	0.03	2.40	-3.48
2	13	0.06	2.56	-2.77
3	16	0.09	2.77	-2.35
4	20	0.12	3.00	-2.05
5	21	0.15	3.04	-1.81
6	22	0.18	3.09	-1.61
7	22	0.21	3.09	-1.43
8	24	0.24	3.18	-1.28
9	25	0.27	3.22	-1.14
10	25	0.30	3.22	-1.02
11	25	0.33	3.22	-0.90
12	26	0.36	3.26	-0.79
13	26	0.39	3.26	-0.69
14	28	0.42	3.33	-0.59
15	28	0.45	3.33	-0.50
16	29	0.48	3.37	-0.41
17	32	0.52	3.47	-0.32
18	32	0.55	3.47	-0.24
19	36	0.58	3.58	-0.15
20	37	0.61	3.61	-0.07
21	39	0.64	3.66	0.01
22	40	0.67	3.69	0.09
23	40	0.70	3.69	0.18
24	48	0.73	3.87	0.26
25	52	0.76	3.95	0.35
26	53	0.79	3.97	0.44
27	54	0.82	3.99	0.53
28	57	0.85	4.04	0.64
29	62	0.88	4.13	0.75
30	64	0.91	4.16	0.87
31	66	0.94	4.19	1.03
32	67	0.97	4.20	1.25

Fuente: Elaboración propia

A partir de la ecuación (9) y graficado mediante Excel se obtienen los parámetros β y η

Figura 5.7 Parámetros β , η



Fuente: Elaboración propia

A partir de la información extraída de la gráfica 5.5 se extrajeron los parámetros:

(Mora, 2009) $\eta = 8.7124$ el parámetro $\beta = 2.3563$; $\beta > 2$ indica que la motoniveladora se encuentra en etapa de desgaste, que la tasa de fallas de la motoniveladora aumenta con el tiempo y es más propenso a fallar a medida que envejece con una tasa de falla creciente y convexa como se observa en la figura 6.4.

El parámetro $\eta = 40.3459$ $\eta > 1$ indica que la vida útil del equipo es finita y disminuye a medida que aumenta η .

Utilizando la ecuación (10) se calcula la confiabilidad tomando en consideración las horas de operación ver tabla 5.20 y se grafica para observar la tendencia como se observa en la figura 5.8

Asimismo, utilizando la función gamma se halló el MTBF de la motoniveladora según la ecuación (11) $MTBF = \eta * \Gamma(1 + 1/\beta) = 35.7547$

Tabla 5.21 Confiabilidad

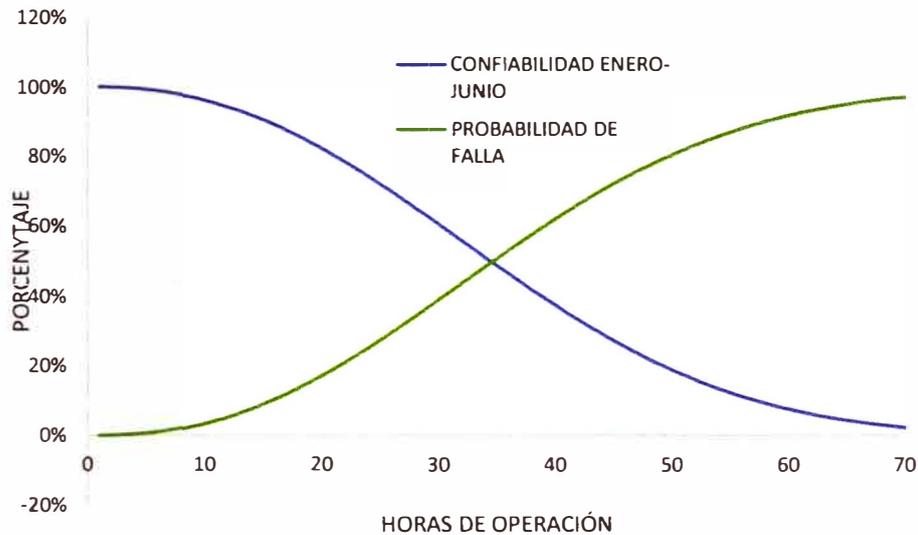
h	CONFIABILIDAD ENERO-JUNIO	DENSIDAD DE PROBABILIDAD	PROBABILIDAD DE FALLA
1	100%	0.000387625	0%
2	100%	0.000991755	0%
3	100%	0.001716531	0%
4	100%	0.002530368	0%
5	99%	0.003414496	1%
6	99%	0.004355311	1%
7	98%	0.005341779	2%
8	98%	0.006364299	2%
9	97%	0.007414126	3%
10	96%	0.008483062	4%
11	95%	0.009563277	5%
12	94%	0.010647214	6%
13	93%	0.011727542	7%
14	92%	0.012797137	8%
15	91%	0.01384908	9%
16	89%	0.014876679	11%
17	88%	0.01587349	12%
18	86%	0.016833349	14%
19	84%	0.017750406	16%
20	83%	0.018619164	17%
21	81%	0.019434512	19%
22	79%	0.020191764	21%
23	77%	0.020886694	23%
24	75%	0.021515562	25%
25	72%	0.022075147	28%
26	70%	0.022562768	30%
27	68%	0.022976299	32%
28	66%	0.023314188	34%
29	63%	0.023575457	37%
30	61%	0.023759711	39%
31	58%	0.023867126	42%
32	56%	0.023898444	44%

Fuente: Elaboración propia

$$R = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \dots \dots \dots \text{ecuación(10)}$$

Finalmente se grafica la confiabilidad mediante la ecuación (10) y la probabilidad de falla como se observa en la figura 5.8

Figura 5.8 Confiabilidad enero- junio



Fuente: Elaboración propia

5.3.5 Cálculo de la Mantenibilidad

Se calculó la Mantenibilidad de la motoniveladora de la misma forma que la confiabilidad, tomando en consideración el histórico de fallas y los TTR respectivos en los sistemas reparables a continuación se aplicó el método estadístico Weibull de 2 parámetros debido a que no se cuenta con los datos suspendidos, $\gamma=0$.

- Se agruparon el total de fallas de los 5 subsistemas (ver tabla 5.20) y se indican las horas de reparación que fueron necesarias.
- Se tomó en consideración la cantidad de fallas ocurridas en los primeros 6 meses de operación (ordinal=32) según la ecuación (6) se hallan los RM (rango de mediana).
- Se calculó el logaritmo natural tanto de los tiempos de falla como del logaritmo natural del logaritmo natural negativo de las probabilidades de falla según ecuación 7 y 8 como se observa en la tabla 5.22

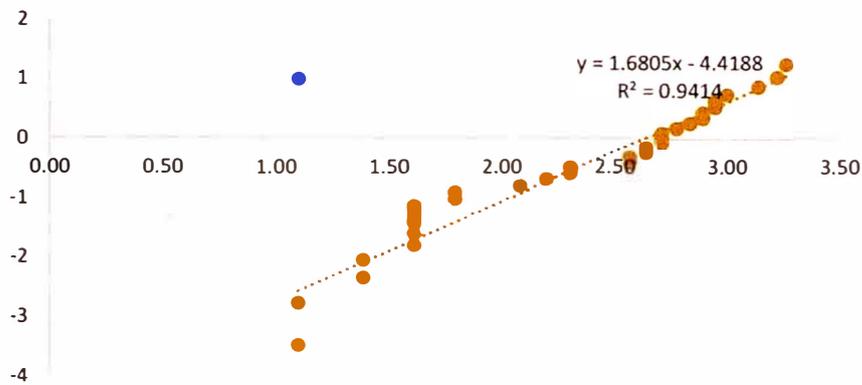
Tabla 5.22 Mantenibilidad enero-junio

ORDINAL	TTR	RM	Ln t	Ln-Ln R	h	MANTENIBILIDAD ENERO-JUNIO
1	3	0.03	1.10	-3.48	1	1%
2	3	0.06	1.10	-2.77	2	4%
3	4	0.09	1.39	-2.35	3	7%
4	4	0.12	1.39	-2.05	4	12%
5	5	0.15	1.61	-1.81	5	16%
6	5	0.18	1.61	-1.61	6	22%
7	5	0.21	1.61	-1.43	7	27%
8	5	0.24	1.61	-1.28	8	33%
9	5	0.27	1.61	-1.14	9	38%
10	6	0.30	1.79	-1.02	10	44%
11	6	0.33	1.79	-0.90	11	49%
12	8	0.36	2.08	-0.79	12	54%
13	9	0.39	2.20	-0.69	13	59%
14	10	0.42	2.30	-0.59	14	64%
15	10	0.45	2.30	-0.50	15	68%
16	13	0.48	2.56	-0.41	16	72%
17	13	0.52	2.56	-0.32	17	76%
18	14	0.55	2.64	-0.24	18	79%
19	14	0.58	2.64	-0.15	19	82%
20	15	0.61	2.71	-0.07	20	84%
21	15	0.64	2.71	0.01	21	87%
22	15	0.67	2.71	0.09	22	89%
23	16	0.70	2.77	0.18	23	90%
24	17	0.73	2.83	0.26	24	92%
25	18	0.76	2.89	0.35	25	93%
26	18	0.79	2.89	0.44	26	94%
27	19	0.82	2.94	0.53	27	95%
28	19	0.85	2.94	0.64	28	96%
29	20	0.88	3.00	0.75	29	97%
30	23	0.91	3.14	0.87	30	97%
31	25	0.94	3.22	1.03	31	98%
32	26	0.97	3.26	1.25	32	98%

Fuente: Elaboración propia

Se prosiguió con hallar los parámetros mediante la aplicación de la gráfica de aproximación lineal y las ecuaciones 7 y 8.

Figura 5.9 Parámetros β y η Mantenibilidad

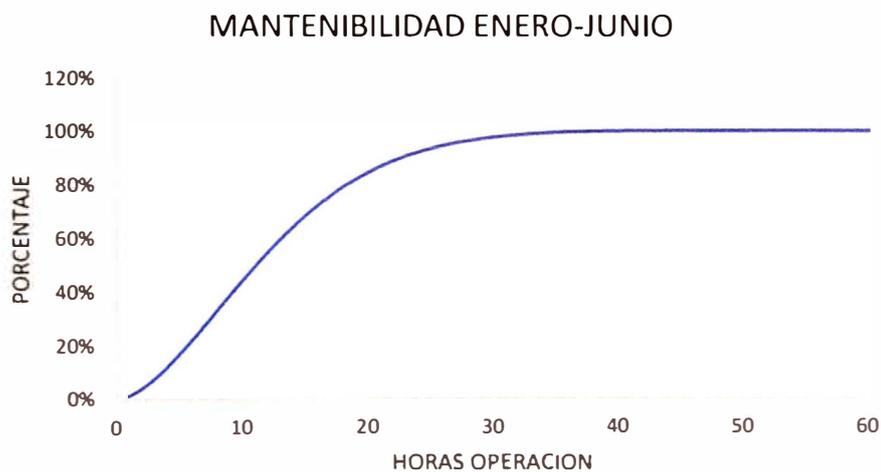


Se recabo la información de la gráfica 5.5 y se extrajeron los parámetros:

$\beta=1.6805$ cte: 4.4188 $\eta=13.86621$ ecuación (11) $MTTR=\eta*\Gamma(1+1/\beta)=12.3820$

$M(T)=1-e^{(-\frac{t}{\eta})^\beta}$ ecuación(12)

Figura 5.10 Mantenibilidad enero-junio



Fuente: Elaboración propia

5.3.6 Disponibilidad inicial

Hallados los indicadores de mantenimiento MTTR=12.3820 y MTBF=35.7547 se continuó con la Disponibilidad Inherente debido a que la naturaleza del proyecto impide utilizar las horas de operación en realizar el mantenimiento por ese motivo no es conveniente utilizar una disponibilidad operacional. Cabe señalar que la disponibilidad hallada se encuentra por debajo de lo esperado por el área de mantenimiento 85%

Según ecuación (3) $D = \frac{35.7547}{35.7547+12.3820} = 74.27\%$

5.4 Fase III

5.4.1 Elección del sistema y definición de su contexto operacional

Tabla 5.23 Descripción de la motoniveladora

ESPECIFICACIONES GENERALES DE LA MOTONIVELADORA CAT 140H		DATOS DE OPERACIÓN	
Modelo	CAT 140H	Consumo Diesel (sub rasante)	3.5 gal/h
Proveedor	FERREYROS S.A.	Consumo Diesel (escarificado)	3 gal/h
Dimensiones	10.097m largo	Velocidad promedio Marcha hacia adelante	12 km/h
	3.131m alto (cabina)	Velocidad promedio Marcha hacia atrás	5 km/h
	2.464m (ancho)	Tracción en la hoja (promedio suelo arcilloso)	11000 kg
Motor Modelo	3176C Diesel 10.3L, 6 cilindros	Promedio hacia abajo (promedio suelo arcilloso)	10500 kg
Potencia neta máxima	222 hp según Normas ISO 9249 y EEC 80/1269	Profundidad de corte hoja (promedio suelo arcilloso)	25mm
Par máximo a 1000 rev/min	1095 Nm	Tracción en el ripper (promedio suelo arcilloso)	11000 kg
Régimen del motor a potencia nominal	2000 rev/min	Presión hacia abajo Ripper (promedio suelo arcilloso)	10500 kg
Sistema hidráulico (presión máxima de sistema)	24 150 kPa	Profundidad de corte Ripper (promedio suelo arcilloso)	25mm

Fuente: <https://www.ferreyros.com.pe/equipo/140/?parent=1912>

5.4.2 Diagrama Operacional (EPS)

Se explica el Diagrama Operacional definiendo las entradas, el proceso y las salidas esperadas como se observa en la tabla 5.24

Tabla 5.24 Diagrama EPS

ENTRADAS	PROCESO	SALIDAS
Materias primas	Nivelar Terrenos, mezclar Aditivos con agregados y refinar taludes	Productos primarios
Terrenos con partículas de diámetro mayor a 8cm y desniveles por encima de los 5cm		Terrenos con partículas de diámetro menor a 8cm y desniveles por debajo de los 5cm
Servicios		Funciones secundarias
Agua de proceso Agregados de construcción, aditivos impermeabilizantes Energía mecánica		Piedras reutilizables para construcción
Controles		Funciones de protección
Potencia mecánica entregada al volante capacidad de rasgado de la hoja		Potencia hidráulica del bastidor delantero bloqueo del diferencial al desgarrar y nivelar
Otros	Funciones de control	
Dureza del suelo		Alarma de temperatura de refrigerante Alarma de temperatura de aceite hidráulico Alarma de temperatura de aceite transmisión Alarma de presión aceite motor Alarma de presión aceite de freno.
Nivel de humedad		Alarma de filtro de aceite de transmisión
Cantidad de rocas con diámetro mayor a 8 cm		

Fuente: Elaboración Propia

Función Primaria de la Motoniveladora

Las funciones primarias son importantes para el RCM porque definen las tareas de mantenimiento que se deben realizar para mantener el activo en funcionamiento. Las tareas de mantenimiento deben estar diseñadas para mantener las funciones primarias de la motoniveladora se define la función primaria de la motoniveladora en el contexto del desarrollo del proyecto.

Tabla 5.25 Función Primaria

FUNCION	TIPICIDAD	DESCRIPCION
Primaria	Parámetro	Especificaciones y parámetros de su función principal
1.Desgarrar el suelo para extraer rocas sedimentos, nivelando el suelo para la construcción y mantenimiento de carreteras	Velocidad de trabajo	Marcha hacia adelante 12km/h Marcha hacia atrás 5 km/h
	Área de trabajo	El Ripper y hoja pueden trabajar 12 m lineales (ancho) de suelo en una pasada
	Profundidad de corte de Ripper	El Ripper desgarrar el suelo con una profundidad de 25cm para extraer las rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm
	Tracción de la hoja	La hoja ejerce una tracción de 11000 kg
	Presión de la hoja	La hoja imprime una presión al suelo de 10500 kg

Fuente: Elaboración Propia

Función Secundaria: La función secundaria no es esencial para el funcionamiento del activo, pero que puede ser importante para su eficiencia, seguridad o comodidad. Las funciones secundarias son definidas en términos de los requisitos del proyecto a analizar.

Tabla 5.26 Función Secundaria

FUNCION	TIPICIDAD	DESCRIPCION
Secundaria	Contención	Regular profundidad de cuchilla
	Soporte	Bastidor delantero y trasero como soportes de la base de la motoniveladora
	Apariencia	La pintura de la motoniveladora cumple con los requerimientos establecidos
	Higiene y seguridad	Cabina cumple con requerimientos de seguridad
	Protección	Protege a la motoniveladora ante incrementos intempestivos fuera de los rangos establecidos
	control	El sistema de alimentación del sistema avanzado de gestión de motores Diesel este compuesto por un módulo de control electrónico
	Subsidiarias	Control electrónico de la transmisión

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3 Estándares de ejecución

Los estándares de ejecución son particulares para el proyecto realizado tomando en consideración los 4300 msnm y el proceso constructivo especificado en el expediente técnico del proyecto como se observa en la tabla 5.27

Tabla 5.27 Estándares de ejecución

FUNCION	ESTANDAR REFERIDO A LA CAPACIDAD DE DISEÑO	ESTANDAR DESEADO PARA LA MOTONIVELADORA
1.Desgarrar el suelo para extraer rocas sedimentos, nivelando el suelo para la construcción y mantenimiento de carreteras y caminos rurales	Potencia máxima neta 222 HP	Potencia máxima neta 170 HP
	Velocidad máxima de recorrido 44km (hacia adelante) 34.7km (hacia atrás)	Velocidad de recorrido deseada 12km (hacia adelante) 5km (hacia atrás)
	Tracción en la hoja 191135 kg	Tracción en la hoja 1 1000 kg
	Diámetro de rocas y sedimentos desde 50mm	Diámetro de rocas y sedimentos hasta 100mm
	Presión máxima del sistema hidráulico 20000kp	Presión máxima del sistema hidráulico 20000kp
	Profundidad de ripeado 462mm	Profundidad de ripeado 25mm

Fuente: Elaboración propia

Descripción de las fallas funcionales de la motoniveladora

Analizadas las funciones primarias y secundarias de la motoniveladora y los estándares de ejecución del proyecto se definen las fallas funcionales y los subsistemas que se ven afectados

Tabla 5.28 Estándares de ejecución

FUNCION PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	SUBSISTEMA
1. Desgarrar el suelo para extraer rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm, mezclar los aditivos y agregados de construcción y nivelar el suelo con una pendiente menor a 5cm	1 A. Inestabilidad golpeteo y vibración, fallas en la transmisión	TREN DE FUERZA
	2.B. No desgarrar el suelo ni extraer rocas con diámetro mayor a 8cm	HOJA
	3.C. Sistema hidráulico inoperativo no puede mover la cuchilla ni escarificador, fuga de fluidos	SISTEMA HIDRAULICO
	4.D. Motor diésel inoperativo	MOTOR
	5.E Fallas en el sistema eléctrico	SISTEMA ELECTRICO

Fuente: Elaboración propia

5.5 Fase III AMEF Descripción de las Fallas Funcionales de la Motoniveladora

Se analizaron los modos y efectos de falla con los controles propuestos de solución a cada uno de los subsistemas afectados.

Tabla 5.29 AMEF Subsistema 1 Tren de Fuerza y Estabilidad

FUNCION PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCION DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
1. Desgarrar el suelo para extraer rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm, mezclar los aditivos y agregados de construcción y nivelar el suelo con una pendiente menor a 5cm	1 A. Inestabilidad golpeteo y vibración, fallas en la transmisión	1.A. 1. Daño engranajes de rotación debido a impurezas minerales en el lubricante	1.A. 1 Se produce una parada de máquina de 4 horas para un cambio	Mantenimiento preventivo
		1.A.2 Pernos y tuercas de sujeción sueltas debido a un mantenimiento de deficiente	1.A.2 Se genera una parada de máquina de 2 horas para revisar los posibles sistemas involucrados en el deficiente mantenimiento, produce peligro para el operador y todo el sistema	Control de Calidad
		1.A.3 Daños barra de tiro debido a una sobre carga en la hoja	1.A.3 Se produce parada de maquina por 6 horas para desmontar el chasis y verificar el grado de fisura en la barra de tiro	Correcta operación
		1.A.4 Pernos de anclaje de estructura de motor, reductor o chumaceras sueltas por deficiente montaje	1.A.4 Se produce una parada de 2 días para llevarla al taller desarmar todo el conjunto del motor puede generar mala calibración de balancines	Control de Calidad

FUNCION PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCION DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.A.5 Falla de sensores de vibración de chumacera, motor y piñón- corona en forma aleatoria por falsa lectura	1.A.5 La máquina se realiza por 4 horas, se pone en By pass mientras dure la revisión del sensor y se cambia por otras similares características	Mantenimiento preventivo
		1.A.6 Alta vibración en los rodamientos (chumaceras y reductor) por fatiga debido a altas cargas de trabajo, contaminación, montaje inadecuado, altas temperaturas del aceite, lubricante inadecuado	1.A.6 Se probará con un rodamiento de mayor resistencia cargas estáticas y dinámicas, así como también el cambio Del aceite lubricante por uno de mejores propiedades tiempo.	Mantenimiento predictivo
		1.A.7 Vibración y ruido en los frenos debido al ingreso de aire al sistema	1.A.7 El sistema de frenos utilizada aceite el ingreso de aire genera cavitación que daña al sistema de frenos, se purga el sistema. Tiempo 4 horas	Mantenimiento predictivo
		1.A.8 Alta vibración por desalineamiento motor – tren de potencia	1.A.8 Realineamiento motor-tren potencia 8 horas	Mantenimiento preventivo
		1.A.9 Ruidos excesivos en el diferencial debido al bajo nivel de aceite en el mismo	1.A.9 Quitar el tapón de vaciado y revisar si hay partículas metálicas en la caja del diferencial tiempo 2 horas	Mantenimiento preventivo

FUNCION PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCION DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.A.10 Aceite extremadamente frio	1.A.10 Sistema de transmisión se sobrecallenta	Control de Calidad
		1.A.11 Exceso de aceite en la transmisión		Mantenimiento preventivo
		1.A.12 Funcionamiento prolongado en velocidad alta		Correcta operación
		1.A.13 Mangueras excesivamente doblada	1.A.13 Rotura de filtro o de sus líneas de aceite	Mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.30 AMEF Subsistema 2 Fallas en la Hoja

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
1. Desgarrar el suelo para extraer rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm, mezclar los aditivos y agregados de construcción y nivelar el suelo con una pendiente menor a 5cm	2.B. No desgarrar el suelo ni extrae rocas con diámetro mayor a 8cm	1.B.1. Grietas en la hoja por uso excesivo y terreno demasiado pedregoso	1.B.1 La capacidad de nivelación del terreno disminuye	Correcta operación
		1.B.2. Fuga en cilindro levantamiento hoja debido a fisuras en las líneas	1.B.2 Se impide el funcionamiento de la motoniveladora	Mantenimiento preventivo
		1.B.3. Daño soporte inclinación de la hoja, ripeco a un ángulo inadecuado	1.B.3 Ripeco deficiente, inadecuada realización de cunetas	Correcta operación
		1.B.4. Grieta en la cuchilla debido a un terreno muy duro	1.B.4.No se realiza un correcto escarificado	Correcta operación
		1.B.5. Velocidad excesiva de trabajo mayor a 20km/h mala operación		Correcta operación
		1.B.7. cuchillas reducidas a menos de 10 mm debido al uso		Mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.31 AMEF Subsistema 3 Fallas en el Sistema Hidráulico

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
<p>1. Desgarrar el suelo para extraer rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm, mezclar los aditivos y agregados de construcción y nivelar el suelo con una pendiente menor a 5cm .</p>	<p>3.C. Sistema hidráulico Inoperativo no puede mover la cuchilla ni escarificador, fuga de fluidos</p>	<p>1.C.1 Baja presión de bomba por incorrecta calibración de válvula de alivio</p>	<p>El operador no puede operar correctamente el equipo y lo para</p>	<p>Control de Calidad</p>
		<p>1.C.2 Baja presión de bomba por desgaste interno</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.C.3 Tanque hidráulico sin aceite por fuga</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.C.4 Válvula de levante atascado por partículas</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.C.5 Implementos se caen fuga interna en cilindros</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.C.6 Alta temperatura de aceite hidráulico por bajo nivel en el tanque</p>		<p>Mantenimiento predictivo</p>
		<p>1.C.7 Alta temperatura de aceite hidráulico por válvula de alivio calibrada a presión muy baja o alta</p>		<p>Control de Calidad</p>

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.C.9 Alta temperatura de aceite hidráulico por restricción en el sistema hidráulico	Aparece alarma de alta temperatura en el indicador de temperatura en el tablero, el operador para el equipo	Mantenimiento preventivo
		1.C.10 Alta temperatura de aceite hidráulico por aceite degradado		Mantenimiento preventivo
		1.C.11 Alta temperatura de aceite hidráulico por ventilador obstruido		Mantenimiento preventivo
		1.C.12 Alta temperatura de aceite hidráulico por baja presión de bomba por desgaste interno		Mantenimiento preventivo
		1.C.13 Fuga en líneas de hidráulicas por rozamiento instalación incorrecta	El equipo se queda sin aceite de hidráulico y no se mueven los implementos o el operador observa la fuga en la inspección preoperacional y para el equipo antes de que se quede sin aceite	Control de Calidad
		1.C.14 Fuga hidráulica por tanque hidráulico por grietas- instalación incorrecta		Control de Calidad

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.C.15 Ventilador no gira o con baja velocidad tanque hidráulico sin aceite por fuga		Mantenimiento preventivo
		1.C.16 Aire en el sistema hidráulico	El operador escucha el ruido en la bomba y para el equipo	Mantenimiento preventivo
		1.C.17 Ruido en la bomba con desgaste interno		Mantenimiento preventivo
		1.C.18 Entrada de agua al sistema hidráulico instalación incorrecta	Mantenimiento recibe los reportes de análisis de aceite y dependiendo de la criticidad solicita parar el equipo y llevarlo al taller para evaluación	Control de Calidad
		1.C.19 Contaminación del aceite de hidráulico con refrigerante enfriador de hidráulico roto		Mantenimiento preventivo
		1.C.20 Análisis de aceite crítico entrada de refrigerante al sistema hidráulico		Mantenimiento predictivo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.32 AMEF Subsistema 4 Falla en el Motor

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
<p>1. Desgarrar el suelo para extraer rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm, mezclar los aditivos y agregados de construcción y nivelar el suelo con una pendiente menor a 5cm</p>	<p>4D. Motor diésel inoperativo</p>	<p>1.D.1 Baja Potencia por filtros de aire Obstruidos</p>	<p>La velocidad del motor está por debajo de 1500 rpm.</p>	<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.D.2 Baja Potencia por filtros de combustible obstruido</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.D.3 Baja potencia por baja presión de combustible. Aire en el combustible</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.D.4 Baja potencia por tanque de combustible sucio</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.D.5 Baja potencia por falla en lóbulo de árbol de levas</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>
		<p>1.D.6 Baja potencia por desgaste en anillos y camisas</p>		<p>Mantenimiento preventivo</p>

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.D.7 Baja potencia por calibración errónea de válvulas		Control de Calidad
		1.D.8 Alta temperatura por radiador obstruido internamente	La temperatura del motor sube por encima de 100°C, enciende la alarma de alta temperatura de motor en el tablero y el operador para el equipo.	Mantenimiento predictivo
		1.D.9 Alta temperatura por filtros de aire obstruidos		Mantenimiento preventivo
		1.D.10 Alta temperatura por baja velocidad del ventilador, causado por baja presión o problemas en el sistema hidráulico del ventilador		Mantenimiento predictivo
		1.D.11 Fuga externa de refrigerante por instalación incorrecta	La fuga de refrigerante ocasiona que el equipo se quede sin refrigerante, la temperatura del motor sube por encima de 100°C, aparece la alarma de alta temperatura de motor o de bajo nivel de refrigerante en el tablero	Control de Calidad
		1.D.12 Fuga externa de refrigerante por tubos y mangueras de refrigerante-instalación incorrecta		Control de Calidad

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.D.13 Fuga de aceite de motor por sellos de cárter instalación incorrecta	La fuga de aceite hace que la presión de aceite cae por debajo de 20 psi, la alarma de baja presión de aceite aparece en el tablero y el operador para el equipo.	Control de Calidad
		1.D.14 Fuga de aceite de motor por sellos de distribución instalación incorrecta		Control de Calidad
		1.D.15 Fuga de aceite de motor por sello frontal del cigüeñal instalación incorrecta		Control de Calidad
		1.D.16 Fuga de aceite de motor por tapones de drenaje instalación incorrecta		Control de Calidad
		1.D.17 Análisis de aceite critico de motor por hollín, problemas de inyección y combustión	El responsable de mantenimiento detecta las fallas y lleva el equipo a taller para el proceso constructivo	Mantenimiento predictivo
		1.D.18 Análisis de aceite critico de motor por hierro, aluminio desgaste interno en el motor		Mantenimiento predictivo

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.D.19 Análisis de aceite crítico por plomo, desgaste en cigüeñal		Mantenimiento predictivo
		1.D.20 Contaminación del aceite de motor con refrigerante		Mantenimiento predictivo
		1.D.21 Contaminación del aceite de motor con combustible, inyectores, culata o bomba de transferencia con fuga		Mantenimiento predictivo
		1.D.22 Motor no gira por problemas mecánicos cigüeñal pegado por falta de lubricación		Mantenimiento predictivo
		1.D.23 Motor gira, pero no arranca por problemas mecánicos, baja presión de combustible y/o aire	El motor no trabaja correctamente, el operador para el equipo	Mantenimiento preventivo
		1.D.24 Motor gira, pero no arranca por problemas mecánicos, falla en el inyector		Mantenimiento preventivo

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.D.25 Motor hace ruidos y vibración anormales debido a que existe combustible dentro del aceite		Mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.33 AMEF Subsistema 5 Fallas en el Sistema Eléctrico

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
1. Desgarrar el suelo para extraer rocas y sedimentos con diámetro mayor a 8cm, mezclar los aditivos y agregados de construcción y nivelar el suelo con una pendiente menor a 5cm	5.E Fallas en el sistema eléctrico	1.E.1 Baja potencia por problemas eléctricos, falla en el solenoide del inyector	La Motoniveladora tiene problemas de funcionamiento no puede desarrollar la potencia necesaria, el escarificado es deficiente, se debe volver a trabajar el terreno	Mantenimiento preventivo
		1.E.2 Baja potencia por problemas eléctricos switch de aceleración no funciona.		Mantenimiento preventivo
		1.E.3 Baja potencia por problemas eléctricos sensor de velocidad y tiempo no funciona		Mantenimiento preventivo

FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA FUNCIONAL	DESCRIPCIÓN DE MODO DE FALLA	EFECTO	CONTROLES PROPUESTOS
		1.E.4 Motor no gira baterías descargadas	El operador no puede hacer funcionar la motoniveladora, se para el proceso constructivo	Mantenimiento preventivo
		1.E.5 Motor no gira circuito de arranque abierto o en corto		
		1.E.6 Alta temperatura de motor, transmisión, hidráulico, sensor de temperatura dañado	El operador para el equipo, no puede detectarse la temperatura de funcionamiento el daño puede ser catastrófico, se debe llevar al taller	Mantenimiento predictivo
		1.E.7 Alta temperatura de motor, transmisión, hidráulico indicador de temperatura abierto o en corto		Mantenimiento predictivo
		1.E.8 Luces no funcionan, circuito abierto o en corto, daño en lámparas, daño en switch		Mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración Propia

5.5.1 Árbol Lógico de Decisiones

Basado en el análisis de los modos de fallo, sus efectos y su criticidad se realizó el árbol de decisiones para determinar las tareas de mantenimiento adecuadas para la motoniveladora como se muestra en la figura 5.11

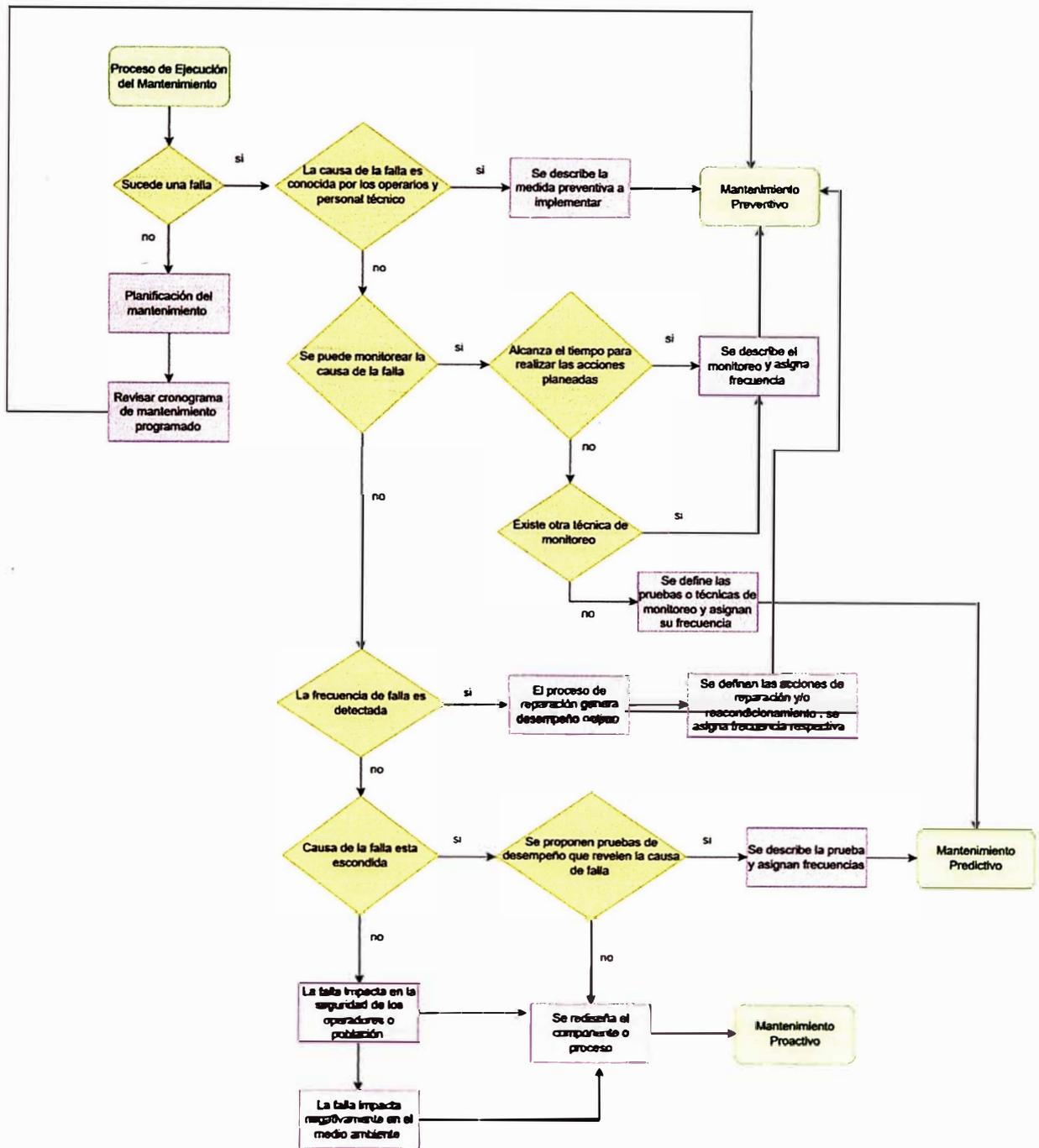
Se especifican los procedimientos a seguir cuando sucede una falla, la Planificación del mantenimiento, el desarrollo del mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Se asignan nuevas pruebas para el monitoreo, asignando frecuencias y personal encargado (ver anexo 3).

Para que el proceso de reparación genere un desempeño óptimo se definen las acciones de reparación y/o reacondicionamiento, asignando una frecuencia apropiada que generan una estrategia de mantenimiento preventivo.

Si la causa de la falla es desconocida, se analizan los impactos en el medio ambiente y el personal técnico, se proponen pruebas de desempeño que revelen la causa de falla o en su defecto se rediseña el proceso.

Se ejemplifican las acciones a tomar mediante la figura 5.11 que se complementan con el anexo 3y 4.

Figura 5.11 Árbol de Decisiones proceso de ejecución del mantenimiento



Fuente: Elaboración Propia

Capítulo VI. Análisis y Discusión de resultados

6.1 Fase IV Descripción de la nueva estrategia de mantenimiento

Después de analizar el árbol de decisiones y el AMEF respectivo se utilizan las herramientas de la confiabilidad para desarrollar la propuesta de mejora en distribuida de la siguiente forma para la motoniveladora:

Mantenimiento Correctivo: Se mantiene el mantenimiento correctivo en atención a las paradas imprevistas de la motoniveladora

Mantenimiento Preventivo: Se adicionan las nuevas estrategias:

- Inspecciones programadas para detectar fugas de aceite en el cárter, cilindros (1.D.13)
- La motoniveladora debe limpiarse regularmente previa utilización para eliminar la suciedad, el barro y otros residuos que puedan obstruir los componentes o causar corrosión que generan una mala operación de rippeo (1.B.2.)
- La motoniveladora debe lubricarse según el manual del fabricante para mantener los componentes en buen estado y evitar el desgaste prematuro.
- El aceite del motor debe cambiarse regularmente para proteger los componentes del motor según las recomendaciones del fabricante (1.D.5 1.D.6). .
- Revisión de los filtros: Los filtros del motor, el aire y el aceite deben revisarse regularmente y reemplazarse según sea necesario tomando en consideración las recomendaciones del fabricante y las particularidades del terreno.

Mantenimiento Predictivo: Se basa en las siguientes pruebas:

- Monitoreo de Análisis de aceite (espectrofotométrico) donde se determina la concentración de los metales del motor Diesel, sistema hidráulico, sistema de transmisión que pueden generar desgaste con partículas de fricción, también se puede

detectar cambios en las condiciones de funcionamiento de los equipos, como cambios en la temperatura, la presión o la viscosidad del aceite.

- **Análisis de aceite (conteo de partículas)** Aplicado sobre el sistema hidráulico, para medir el nivel de contaminación debido a que la suciedad, el metal, el agua y los productos químicos, pueden provocar el desgaste prematuro de los componentes hidráulicos. Asimismo, el análisis de aceite puede detectar cambios en la viscosidad, el color o el olor del aceite. Estos cambios pueden indicar problemas con el sistema hidráulico, como fugas, obstrucciones o problemas de temperatura.

- **Termografía en los componentes hidráulicos:** Las fugas de fluido hidráulico pueden provocar un aumento de la temperatura en las áreas circundantes. La termografía puede ayudar a identificar estas áreas de alta temperatura, lo que puede indicar una fuga o una obstrucción. Se plasma la mejora de la gestión de mantenimiento en el Anexo B

6.2 Análisis de resultados

Después de aplicado la mejora en la gestión de mantenimiento para la motoniveladora en el contexto operacional de los siguientes 6 meses (julio-diciembre) con 1152 horas aproximadas de funcionamiento. En la ejecución del proyecto se observaron los siguientes resultados replicando la metodología del capítulo 5.3.2 Calculo de KPI's:7

Tabla 6.1 KPI's Finales

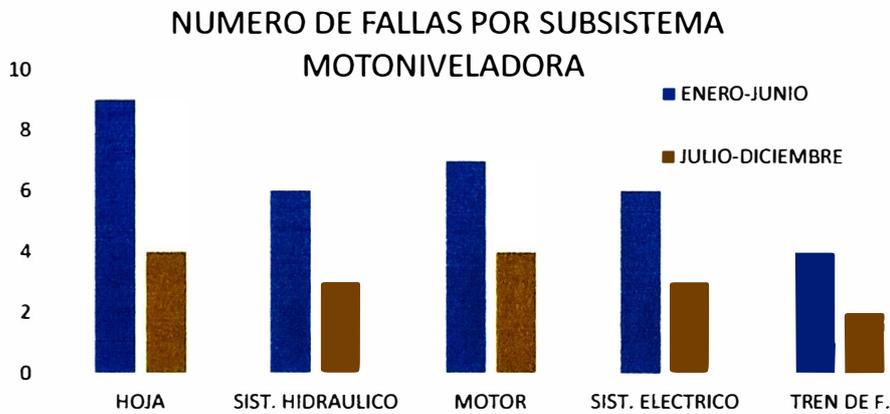
ORDINAL	HORÓMETRO	TTR	TBF	SUBSISTEMA
1	51	10	51	HOJA
2	127	10	66	HIDRÁULICO
3	193	8	56	MOTOR
4	241	4	40	ELECTRICO
5	287	5	42	TREN
6	308	9	16	
7	375	20	58	
8	406	3	11	
9	479	13	70	
10	527	5	35	
11	604	12	72	
12	681	6	65	
13	781	2	94	
14	834	17	51	
15	965	8	114	
16	1114	15	141	

Fuente: Elaboración propia

- Se observó que la cantidad de fallas por cada subsistema disminuyeron debido a la mejora de la gestión de mantenimiento (ver figura 6.1); el subsistema más beneficiado fue hoja se redujeron las fallas 1.B.3 y 1.B.5 mediante el Mantenimiento Proactivo (se rediseño el proceso constructivo) como indica la figura 5.11 que generó una correcta operación de la motoniveladora en conjunto con una capacitación del personal encargado.
- En el caso del subsistema Hidráulico se redujeron a la mitad las fallas 1.C.4 y 1.C.10 debido a la aplicación del mantenimiento Predictivo Análisis de aceites (conteo de partículas) y en el caso de los 1.C.13 ;1.C.14;1.C.18 mediante el mantenimiento preventivo.
- Subsistema Motor se eliminaron las fallas 1.D.1;1.D.4;1.D.13 mediante la aplicación del Mantenimiento preventivo.
- Sub sistema Eléctrico se evitaron la fallas 1.E.4;1.E.5 con mantenimiento preventivo y 1.E.6 con predictivo

- Sub sistema Tren se corrigieron las fallas 1.A.8 ;1.A.9 se utilizó el mantenimiento preventivo.

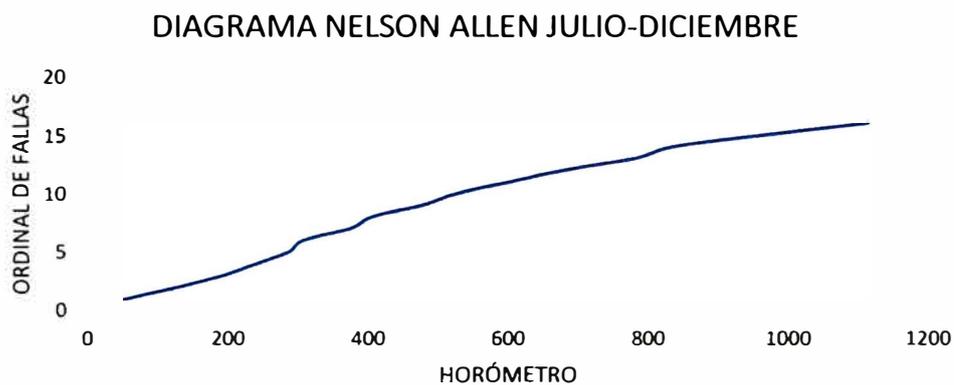
Figura 6.1 Comparación de las fallas por cada subsistema



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se utilizó el diagrama de Nelson Allen para determinar la distribución de probabilidad que se adapta mejor a nuestros datos de manera similar que en 5.3.3. Al observar la gráfica 6.2 y tomando en consideración el ítem 5.3.3 se concluye que los datos finales julio-diciembre se adaptan mejor a una distribución Weibull.

Figura 6.2 Diagrama Nelson Allen julio-diciembre



Fuente: Elaboración propia

6.3 Contratación de los Resultados

6.3.1 Análisis del MTBF y la Confiabilidad Final

Para obtener la confiabilidad final julio-diciembre se realizó el mismo procedimiento que

5.3.4

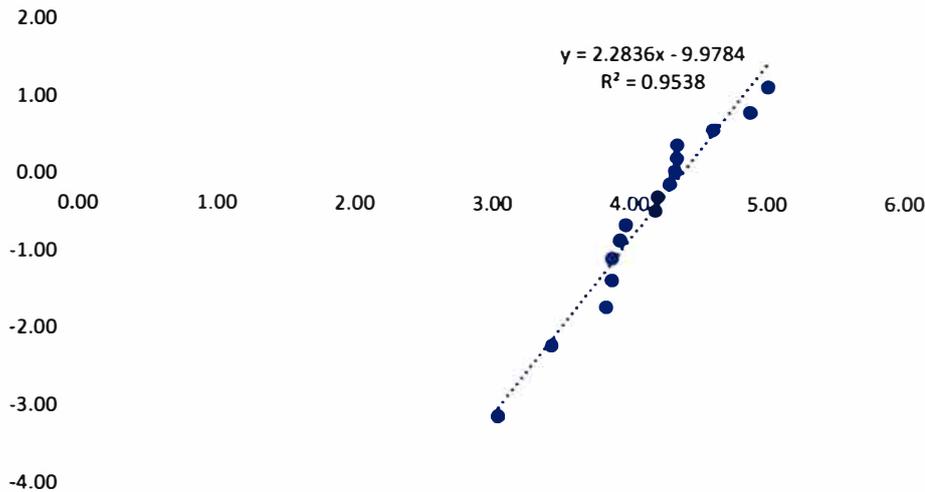
Tabla 6.2 Parámetros de la Confiabilidad final

ORDINAL	HOROMETRO	RM	Ln f	Ln(-Ln R)	HORAS OPERACIÓN	CONFIABILIDAD JULIO-DICIEMBRE
1	21	0.04	3.04	-3.13	1	100%
2	31	0.10	3.43	-2.21	2	100%
3	46	0.16	3.83	-1.72	3	100%
4	48	0.23	3.87	-1.36	4	100%
5	48	0.29	3.87	-1.09	5	100%
6	51	0.35	3.93	-0.85	6	100%
7	53	0.41	3.97	-0.64	7	100%
8	66	0.47	4.19	-0.46	8	99%
9	67	0.53	4.20	-0.28	9	99%
10	73	0.59	4.29	-0.11	10	99%
11	76	0.65	4.33	0.06	11	99%
12	77	0.71	4.34	0.22	12	99%
13	77	0.77	4.34	0.40	13	98%
14	100	0.84	4.61	0.59	14	98%
15	131	0.90	4.88	0.82	15	98%
16	149	0.96	5.00	1.15	16	97%

Fuente: Elaboración Propia

Se prosiguió con hallar los parámetros mediante la aplicación de la gráfica de aproximación lineal (ver figura 6.3) y las ecuaciones 7 y 8.

Figura 6.3 Parámetros β, η



Fuente: Elaboración Propia

$\beta=2.2836$ $\eta= 79.0113$ $cte= 9.9784$ ecuación (8)

6.3.2 Análisis del MTBF

Se halló mediante la aplicación de la ecuación 10 utilizando los parámetros β y η :

$MTBF=\eta*\Gamma(1+1/\beta)=69.9919\dots$ ecuación (11)

El MTBF de toda la motoniveladora aumento un 48.91 % comprobando la hipótesis, el subsistema hidráulico y el motor fueron los más beneficiados por la aplicación del mantenimiento predictivo (Monitoreo de Análisis de aceite y termografía) que permitieron detectar fugas, obstrucciones en el sistema hidráulico y temperaturas anómalas que con un mantenimiento realizado a tiempo permitió evitar la parada de la motoniveladora.

La operación adecuada de la motoniveladora también colaboro en el aumento del MTBF debido a que disminuyo las horas de para y evito que se puedan acelerar el desgaste y la degradación, lo que aumentaba el riesgo de fallas.

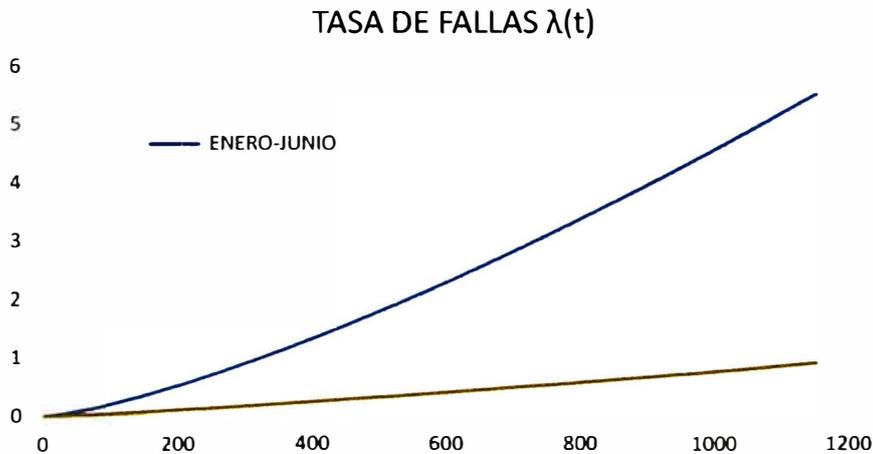
6.3.3 Tasa de Fallas

Mediante la utilización de la ecuación (13) se hallaron los valores de la tasa de fallas a lo largo de las 1152 horas de operación.

$$\text{Tasa de fallas } \lambda(t) = \frac{\beta}{n} \left(\frac{t-t_0}{n} \right)^{\beta-1} \dots \text{ecuación (13)}$$

Al comparar las gráficas de la tasa de fallas inicial y final (figura 6.4) se observó que en el caso de julio-diciembre la tasa de fallas se presenta de forma más horizontal esto demuestra que al igual que en el análisis del MTBF que la operación de la motoniveladora se mantiene más estable sin grandes fluctuaciones en la frecuencia de fallas en comparación del periodo enero-junio, también indica una gestión efectiva de los riesgos, las estrategias de mantenimiento preventivo están siendo efectivas en la prevención de fallas y en la prolongación de la vida útil de la motoniveladora.

Figura 6.4 Tasa de Fallas



Fuente: Elaboración Propia

6.3.4 Confiabilidad final julio-diciembre

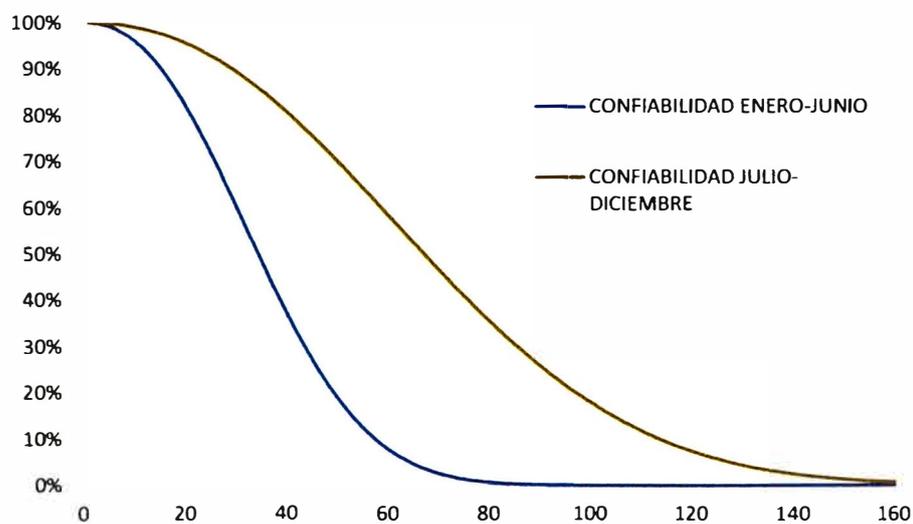
A partir de los parámetros β , η y utilizando la ecuación 9 se grafica la confiabilidad del periodo julio-diciembre con las 1152 horas de operación ver figura 6.5

$$R = \exp \left(- \left(\frac{t-y}{\eta} \right)^{\beta} \right) \dots \text{ecuación (10)}$$

En el periodo julio-diciembre se observó un aumento en la confiabilidad (ver figura 6.5) comprobando la hipótesis debido a la mejora de la capacidad de la motoniveladora para funcionar de manera consistente y predecible durante un período más prolongado de tiempo ,con un riesgo reducido de fallos y con mayor capacidad de cumplir con su función principal y secundaria sin interrupciones no planificadas mediante la utilización del AMEF y el árbol de decisiones que definieron el mantenimiento preventivo y predictivo a utilizarse, como se observó en la tabla 6.2.

El incremento del MTBF en 48.91% incidió también en el aumento de la confiabilidad. En la gráfica 6.5 se demuestra que en el periodo julio-diciembre la motoniveladora tiene una probabilidad de funcionar sin fallas del 90% a las 30 horas de operación en comparación con el periodo enero-junio que es del 61% esto significa un notable avance en la ejecución de la obra y el cumplimiento de los plazos establecidos en el contrato, corroborando la hipótesis planteada.

Figura 6.5 Comparación de la confiabilidad inicial y final



Fuente: Elaboración Propia

6.3.5 Análisis del MTTR y Mantenibilidad Final julio-diciembre

Para obtener la Mantenibilidad final julio-diciembre se realizó el mismo procedimiento que 5.3.5

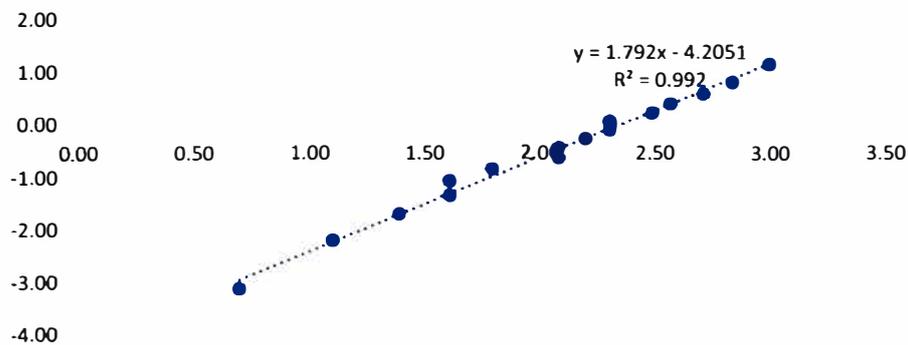
Tabla 6.3 Mantenibilidad final

ORDINAL	TTR	RM	Ln t	Ln(-Ln R)	fi	MANTENIBILIDAD JULIO-DICIEMBRE
1	2	0.04	0.69	-3.13	1	1%
2	3	0.10	1.10	-2.21	2	5%
3	4	0.16	1.39	-1.72	3	10%
4	5	0.23	1.61	-1.36	4	16%
5	5	0.29	1.61	-1.09	5	23%
6	6	0.35	1.79	-0.85	6	31%
7	8	0.41	2.08	-0.64	7	39%
8	8	0.47	2.08	-0.46	8	46%
9	9	0.53	2.20	-0.28	9	53%
10	10	0.59	2.30	-0.11	10	60%
11	10	0.65	2.30	0.06	11	67%
12	12	0.71	2.48	0.22	12	72%
13	13	0.77	2.56	0.40	13	77%
14	15	0.84	2.71	0.59	14	82%
15	17	0.90	2.83	0.82	15	85%
16	20	0.96	3.00	1.15	16	88%

Fuente: Elaboración Propia

Se prosigió con hallar los parámetros mediante la aplicación de la gráfica de aproximación lineal (ver figura 5.6) y las ecuaciones 7 y 8.

Figura 6.6 Parámetros β, η



Fuente: Elaboración Propia

$\beta=1.792$ cte: 4.2051 $\eta=10.449937$ ecuación (8)

6.3.6 Análisis del MTTR

Se halló mediante la aplicación de la ecuación 10 utilizando los parámetros β y η : $MTTR=\eta*\Gamma(1+1/\beta)=9.2950\dots$ ecuación (11)

En promedio el MTTR disminuyó en 33.21 % comprobando la hipótesis resultada de la mejora de la gestión de mantenimiento que redujo el tiempo de inactividad de la motoniveladora debido al tiempo de reparación, se debe principalmente al mantenimiento preventivo que redujo la cantidad de fallas en los subsistemas y su correcta solución utilizando el AMEF correspondiente y aplicando el árbol de decisiones (ver figura 5.11).

Cabe resaltar que a diferencia del MTBF, el MTTR tuvo una mejora menos sustancial esto sucedió debido a la localización del proyecto 4300 msnm y la condición de micro empresa del consorcio ejecutante no se cuenta con un taller de mantenimiento ubicado en un lugar específico generándose de esta forma pérdidas de tiempo en el traslado de componentes y personal técnico.

6.3.7 Análisis de la Mantenibilidad

A partir de los parámetros β , η y utilizando la ecuación 11

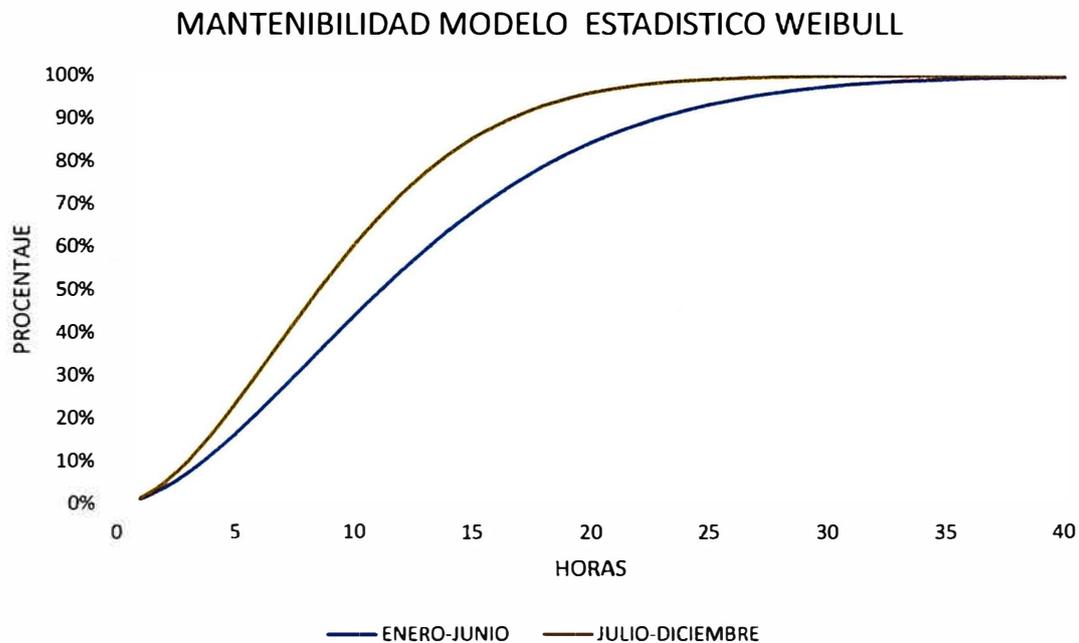
$$M(T)=1-e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots \text{ecuación(12)}$$

Se utilizan las 1152 horas de operación para graficar la mantenibilidad en concordancia con el modelo estadístico de Weibull ver figura 6.7.

Se observó el aumento de la mantenibilidad en el periodo julio-diciembre, indica que las mejoras implementadas en el mantenimiento hicieron que los tiempos de mantenimiento TTR resulten más veloces logrando así una mejora en términos de

rendimiento y eficiencia, como se puede observar en la figura 6.9 la probabilidad de completar una acción de reparación en 10 horas es del 60% en comparación con el periodo enero-junio que es 44%.

Figura 6.7 Comparación de la Mantenibilidad inicial y final



Fuente: Elaboración Propia

6.3.8 Análisis de la Disponibilidad

Se observa que los subsistemas mejoraron significativamente su disponibilidad comprobando la hipótesis debido a la disminución de las fallas imprevistas, las paradas de máquina y el incremento de los tiempos sin fallas, gracias a la implementación del mantenimiento preventivo que logra prever fallas en el subsistema motor, los que según el criterio de Jack knife son los subsistemas crónicos.

Sin embargo, la disponibilidad inherente aún se mantiene en el límite requerido por la empresa para cumplir con los plazos de ejecución de la obra.

Según ecuación (3) $D_{final} = \frac{69.9919}{69.9919+9.2950} = 88.27\%$

Conclusiones

- Se concluye que mediante la aplicación del RCM se mejoró la Gestión de mantenimiento, se demuestra con el incremento de los Kpi's más importantes: El MTBF global de la motoniveladora y la disponibilidad aumentaron en un 48.91 % y 14% respectivamente y el MTTR disminuyó en 33.21%.
- Se concluye que a pesar de la mejora en la Gestión de Mantenimiento la disponibilidad inherente tuvo un incremento inferior al resto de KPI's debido a la localización del proyecto 4300 msnm ,la accesibilidad del camino rural, ausencia de fluido eléctrico y señal telefónica sumado a las condiciones climáticas adversas (nevadas constantes) y la condición de micro empresa del consorcio ejecutante no permitieron establecer un taller de mantenimiento cercano a la ejecución de la obra generándose de esta forma pérdidas de tiempo en el traslado de componentes y personal técnico que aumentaron significativamente los TTR ;generando a su vez una mejora del 14% en la disponibilidad.
- Se concluye que a pesar del aumento de la disponibilidad inherente en 14%, este indicador clave de desempeño se mantiene en el límite aceptado por la empresa para cumplir con los plazos de ejecución de la obra.
- Se concluye que aplicado el RCM donde se especificaron las labores de mantenimiento preventivo y predictivo a realizar se logró la mejora en la gestión de mantenimiento en el período julio-diciembre logrando reducir el número de fallas en un 50% en comparación con el periodo enero-junio.
- Se concluye que aplicada la metodología RCM la Confiabilidad aumentó en el periodo julio-diciembre por que la motoniveladora tiene una probabilidad de funcionar sin fallas del 90% a las 30 horas de operación en comparación con el periodo enero-junio que es del 61%.

- Se concluye que aplicada la metodología RCM la Mantenibilidad aumentó en el periodo julio-diciembre por que la probabilidad de completar una acción de reparación en 10 horas es del 60% en comparación con el periodo enero-junio que es 44%.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar un nuevo análisis de criticidad previo a la ejecución de futuros proyectos debido a la diferencia de los procesos constructivos, variedad de climas, suelo, ubicación, altitud que podrían determinar un equipo crítico diferente al determinado en el trabajo de suficiencia presentado.
- Se recomienda en futuros análisis realizar una discriminación previa entre componentes reparables y reemplazables para obtener resultados más certeros con respecto a la confiabilidad de los equipos.
- Se recomienda incluir en futuros análisis RCM los subsistemas de llantas y chasis pues representan componentes importantes de la maquinaria pesada.
- Se recomienda que el ingeniero responsable realice un filtrado de datos previo a la aplicación de fórmulas y gráficos de los KPI's que permitirán obtener resultados más exactos utilizando el modelo estadístico.
- Se recomienda acompañar al mantenimiento programado con el requerimiento de compra de repuesto para lograr que se programe oportunamente su intervención con el propósito de reducir los tiempos de reemplazo.
- Se recomienda que el monitoreo de condición debe estar acompañado con los valores referenciales para tener la certeza si un ítem se encuentra en estado de alerta.

Referencias Bibliográficas

- Amendola, L. (2016). *Modelos Mixtos de Confiabilidad*. Madrid, España: PMM Institute for Learning.
- Anjay, K. (2020). Análisis de mantenimiento operativo de equipos de construcción de carreteras utilizadas activamente. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321000742>
- Canchanya, M., & Gregorio, A. (2019). *El Análisis de Confiabilidad como herramienta para mejorar la estrategia de Gestión de mantenimiento de la flota de Carguío en la minera Miski Mayo*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Estado Peruano. (s.f.). *REGLAMENTO DE LA LEY DE CONTRATACIONES DEL ESTADO*. Obtenido de https://portal.osce.gob.pe/osce/sites/default/files/Documentos/legislacion/ley/2018_DL1444/DS%20344-2018-EF%20Reglamento%20de%20la%20Ley%20N%2030225.pdf
- Jardine, A. (2013). *Teoría y aplicaciones de mantenimiento, reemplazo y confiabilidad*. Florida, Estados Unidos de América: Taylor and Francis Group.
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento Planeación, Ejecución y Control*. México: Alfa y Omega.
- Reservados, T. I. (s.f.). *Comex Perú*. Obtenido de <https://www.comexperu.org.pe/upload/articles/reportes/reporte-comexperu-001.pdf>
- Saaty, T. (2014). *Toma de Decisiones para líderes*. Pittsburgh, Estados Unidos de América: RWS Publications.
- Santos, O., & Sayri, J. (2019). *Mejora de la gestión de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad en la línea de carbonato de calcio de la empresa minerales del Pacífico Sur*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Shear, J., & Keller, G. (2004). *Ingeniería de caminos rurales*. Estados Unidos de América.
- Sifonte, J. (2017). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. Taylor and Francis.
- Tianliang, L., & Yuanzheng, L. (2020). Desarrollo y tecnologías clave de maquinaria de construcción puramente eléctrica. (U. d. Zhejiang, Ed.) doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110080>

Valverde, G., & Arestegui, A. (2019). *Propuesta de mejora basada en confiabilidad del plan de mantenimiento de los equipos de la planta de chancado de una unidad minera*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Xudong, S., & Xiuyan, T. (2019). Siete tabúes en la reparación y mantenimiento de maquinaria de construcción. Obtenido de https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GCJA200707019.htm

Yañez, M. (2007). *Confiabilidad Integral*.

Anexos

Anexo 1 Check List Inicial

		CHECK LIST		
		MOTONIVELADORA – 140H		
		Fecha de inscripción:	03 / 03 /2021	
		Hora de inicio:	08:00	
		Hora de finalización:	08:30	
ESTADO DE LOS COMPONENTES A INSPECCIONAR			OK	NOT OK
CABINA				
1	CABINA: Revisar el estado adecuado de limpieza		X	
2.	ASIENTO DE OPERADOR: Verificar el estado optimo y funcionabilidad		X	
3	CINTURON DE SEGURIDAD: Verificar el buen estado y funcionabilidad		X	
4	TABLERO DE CONTROL: Revisar el estado optimo y funcionabilidad		X	
5	JOYSTICK: Revisar el buen estado y movimiento de los mandos		X	
6	PEDALES: Revisar la operación y juego libre		X	
7	FRENO DE ESTACIONAMIENTO: Verificar el correcto funcionamiento		X	
8	COMPUTADORAS: Revisar las correctas conexiones del cableado, detrás del asiento del operador		X	
MOTOR DIESEL - CAT C13				
1	CARTER: Verificar el nivel correcto de aceite (añadir si es necesario e informar)			X
2	FILTRO DE ACEITE: Revisar el buen estado, sin fugas o daños		X	
3	TANQUE DE COMBUSTIBLE: Verificar el nivel correcto (añadir si es necesario)		X	

4	FILTRO DE COMBUSTIBLE: Revisar el buen estado, sin fugas o daños		X
5	FILTRO SEPARADOR DE AGUA DEL SISTEMA COMBUSTIBLE: Revisar el buen estado, sin fugas o daños	X	
6	BOMBA DE CEBADO SIST. COMBUSTIBLE: Cegar el sistema antes de arrancar y revisar buen estado		X
7	FILTROS DE AIRE: Revisar el buen estado de limpieza	X	
8	ANTEFILTRO DE AIRE: Limpiar rejilla del ante filtro con aire comprimido.	X	
9	NÚCLEO DE RADIADOR: Revisar el buen estado de limpieza (limpiar de ser necesario e informar)	X	
10	TANQUE DE REFRIGERANTE: Verificar el nivel correcto de refrigerante (añadir si es necesario e informar)	X	
11	BATERÍAS: Verificar la tensión eléctrica y el correcto ajuste de los bornes	X	
12	ENFRIADOR DE ACEITE: Revisar el buen estado de limpieza (limpiar si es necesario e informar)	X	
13	VENTILADOR: Revisar el buen estado de los alabes	X	
14	MOTOR HIDRAULICO DEL VENTILADOR: Revisar el buen estado, sin fugas o daños	X	
15	SENSORES & HARNÉS: Revisar el buen estado físico (comunicar si existe algún daño)	X	
TREN DE FUERZA			
1	CARTER: Verificar el nivel correcto de aceite de transmisión (añadir si es necesario e informar)	X	
2	SERVOTRANSMISIÓN DE CONTRAEJES: Revisar el buen estado físico, sin fugas o daños externos	X	
3	VÁLVULAS DE CONTROL Y SOLENOIDES: Revisar el buen estado físico, sin fugas o daños externos	X	
4	TANDEM: Revisar el buen estado físico, sin fugas o daños externos	X	
5	MANGUERAS: Revisar el buen estado físico, sin fugas, grietas o daños en los conectores	X	
6	NEUMÁTICOS: Verificar el estado óptimo (presión y desgaste de cocada)	X	
SISTEMA DE IMPLEMENTOS			
1	TANQUE HIDRAULICO: Verificar el nivel correcto de aceite (añadir si es necesario e informar)	X	
2	BOMBAS Y MOTORES HIDRÁULICOS: Revisar el buen estado físico, sin fugas o daños externos	X	
3	MANGUERAS: Revisar el buen estado físico, sin fugas, grietas o daños en los conectores	X	
4	VÁLVULAS DE CONTROL: Revisar el buen estado físico, sin fugas o daños externos	X	
5	ACTUADORES: Revisar el buen estado superficial de los cilindros y vástago, sin fugas daños externos	X	
ESTRUCTURA Y COMPONENTES DE DESGASTE			
1	CHASIS: Revisar buen estado, sin fisuras o deformaciones	X	
2	RIPPER: Revisar buen estado, sin fisuras, desgastes o deformaciones		X

3	HOJA TOPADORA: Revisar buen estado, sin fisuras, desgastes o deformaciones		X	
PRUEBAS DEL EQUIPO EN FUNCIONAMIENTO				
1	HOROMETRO: Verificar lectura con la chapa de contacto en posición ON	Horas	X	
PUNTOS DE LUBRICACIÓN DIARIAS O CADA 10 HORAS				
1	DIENTES DEL PIÑÓN DEL MANDO DEL CÍRCULO: Engrasar con una película delgada de grasa		X	
2	SUPERFICIE SUPERIOR DEL CÍRCULO: Engrasar con una película delgada de grasa		X	

Anexo 2 Nueva propuesta de Mantenimiento Periódico

MANTENIMIENTO PERIODICO	
CADA VEZ QUE SE REQUIERA	
Cambio de los insertos de desgaste de la hoja	Lubricación de agujeros del pasador del bloqueo del caballete
Limpieza o cambio de los filtros de aire fresco y de aire recirculado de la cabina	Limpieza de filtro de admisión de aire del motor (si lo indica el monitor)
Lubricación del piñón del círculo	Limpieza de los bornes de batería y apriete de abrazaderas
Inspección y ajuste de la presión de los neumáticos	Limpieza del radiador, enfriador de aceite, enfriador de aire de carga y enfriador de combustible
Ajuste del espacio libre de los insertos de desgaste del círculo de hoja y bastidor de tiro	Vaciado del agua y sedimentos del sumidero del tanque de combustible
Juste o cambio de los receptáculos de los cilindros elevadores de la hoja	Inspección de las correas
CADA 10 HORAS O DIARIAMENTE	
Revisión del nivel de aceite del depósito hidráulico	Revisión del nivel de aceite del motor
Revisión del nivel de aceite de la transmisión	Revisión del nivel del tanque de rebose de refrigerante del motor
CADA 50 HORAS	
Lubricación de la desgarradora y/o el escarificador trasero	Lubricación del pivote de inclinación del puente delantero

Lubricación de pivotes de los chasis	Lubricación de pasadores de dirección del puente delantero
Lubricación de pivotes del cilindro de dirección del chasis	Lubricación de extremos de barra de acoplamiento
Lubricación de pivotes de horquillas de cilindros elevadores	Lubricación del extremo de cabeza de los pivotes de cilindro de la dirección
Lubricación de bola de bastidor de tiro	Lubricación de brazos y cilindros elevadores de la hoja
Lubricación de pivotes de cilindro de inclinación de eje delantero	Lubricación del pasador de bloqueo del caballete
Lubricación del escarificador y/o hoja topadora delanteros	Lubricación de pivotes de cilindros de orientación de hoja
Lubricación de pasadores de pivote del puente delantero	Revisión y vaciado de filtro de combustible
Lubricación del pasador de oscilación del puente delantero	

Anexo 3 Nueva propuesta de Mantenimiento Integral

PROPUESTA DE NUEVO PLAN DE MANTENIMIENTO MOTONIVELADORA CAT 140H						
HOROMETRO: 120			HORA INICIO:08:30			
FECHA:03/09/20			HORA FINAL:13:00			
RESPONSABLE: FERNANDO FLORES						
CON EL EQUIPO ENCENDIDO, ESTACIONADO Y PREVIO A CORTAR LA CORRIENTE	REALIZADO	FRECUENCIA (H)				
		INSPECCION	200	500	1000	2000
1. Inspección por ruidos anormales de los ventiladores de los enfriadores hidráulicos		X	X	X	X	x
2. Inspección de fisuras en el equipo de trabajo (mover hoja para la inspección)			X	X	X	x
3. Inspección de fisuras en los alabes de los ventiladores del sistema hidráulico y radiador de motor			X	X	X	x
4. Realizar pruebas en el sistema de lubricación y verificar que la barra de tiro esta engrasada.			X	X	X	x
SEGURIDAD <ol style="list-style-type: none"> Ubicar la motoniveladora en un lugar plano y espacioso Mientras dure el mantenimiento el lock-out deberán estar instalados Utilice el APT Demarque con conos el área de trabajo, vehiculos menores fuera del área Cuando se enciende la maquina nuevamente solo personal minimo deberá permanecer en la maquina 						

MOTOR DIESEL	REALIZADO	FRECUENCIA (H)				
		INSPECCION	200	500	1000	2000
1.Verificar nivel de aceite		X	X	X	X	x
2.Cambiar aceite según muestreo			X	X	X	x
3.Cambio de filtro de combustible				X	X	x
4.Cambio de filtro de refrigerante según resultado de test de concentración de anticongelante			X	X	x	x
5.Verificar nivel de refrigerante			X	X	X	x
6.Limpiar filtro de aire		X	X	X	X	x
7.Verificar tensión de faja de alternador			X	X	X	x
8.Verificar estado baja de alternador, si es necesario cambiar				X	X	x
9.Verificar pernos de montaje de motor			X	X	X	x
10.Verificar nivel de aceite de mando de acoplamiento			X	X	X	x
11.Drenar condensación de tanque de combustible		X	X	X	X	x
12.Inspeccionar tapa de radiador (sellado de desgaste, roturas)		X	X	X	X	X
13.Revisar ajuste de pernos de abrazaderas de ductos del sistema de escape			X	X	X	x

14.Líneas, mangueras y abrazaderas del sistema de enfriamiento (fugas, roturas, sueltas)		X	X	X	X	x
15.Revisión del data cense del motor			X	X	X	x
16.Análisis espectrofotométrico de aceite			X	X	X	x
17.Realiza la inspección y limpieza de los conectores, líneas y sensores del sistema eléctrico de motor				X	X	x
18.Verificar nivel de aceite de caja de engranajes de giro		X	X	X	X	X
19.Verificar nivel de aceite del compartimiento de freno			X	X	X	x
20.Cambiar aceite de compartimiento de freno			X	X	X	
21.Inspeccionar el buen estado de las abrazaderas de las cañerías			X	X	X	x
22.Revisar el apriete de las cañerías del sistema de lubncación		X	X	X	X	x
23.Verificar el buen desplazamiento del inyector			X	X	X	x
24.Verificar cantidad de grasa de cada inyector			X	X	X	x
SISTEMA ELECTRICO	REALIZADO	FRECUENCIA (H)				
		INSPECCION	200	500	1000	2000

1.Verificar funcionamiento de paradas de emergencia		X	X	X	X	x
2.Verificar cables de tierra para motor		X	X	X	X	x
3.Verificar cables de tierra para cabina		X	X	X	X	x
4.Inspección general para sistema de alumbrado		X	X	X	X	x
5.Limpiar caja de baterías			X	X	X	x
6.Revision nivel de fluidos de batería			X	X	X	x
7.Verificar cable & terminal de seguridad y estabilizador			X	X	X	x
8.Verificar abrazaderas de seguridad de baterías			X	X	X	x
9.Limpiar terminales de batería			X	X	X	x
10.Verificar voltaje de batería			X	X	X	x
11.Revisa el nivel de electrolito de batería			X	X	X	x
12.Verificar tensión y estado de faja de alternador			X	X	X	x
13.Verificar voltaje del sistema eléctrico			X	X	X	x
14.Revision del estado de conexiones y líneas eléctricas de arranque			X	X	X	x
15.Limpiar y revisar las líneas eléctricas del sensor (sensor de nivel de aceite)			X	X	X	x

16.Revisar la limpieza de contactores durante el mantenimiento				X	X	x
17.Realizar la inspección de líneas eléctricas durante el mantenimiento				X	X	x
18.Realizar la limpieza de los conectores de los faros				X	X	x
19.Cambio de sensor de nivel de aceite hidráulico					X	x
20.Limpiar y revisar el joystick y líneas eléctricas durante el mantenimiento					X	x
CABINA	REALIZADO	FRECUENCIA (H)				
		INSPECCION	200	500	1000	2000
1.Verificar nivel del agua del reservorio del limpia parabrisas			X	X	X	x
2.Rellenar agua al reservorio del limpia parabrisas				X	X	x
3.Evaluar joystick ajuste si es necesario			X	X	X	x
4.Evaluar pedales de control que se encuentren en buen estado		X	X	X	X	X
5.Evaluar estado de vidrios		X	X	X	X	X
6.Inspeccionar estado de plumillas y motor de limpia parabrisa		X	X	X	X	X
7.Evaluar espejos retrovisores		X	X	X	X	X

8.Verificar operatividad de cinturón de seguridad		X	X	X	X	X
HOJA	REALIZADO	FRECUENCIA (H)				
		INSPECCION	200	500	1000	2000
1.Verificar estado de elementos de desgaste: dientes, entre dientes		X	X	X	X	X
2.Inspeccionar posibles fisuras en el escarificador		X	X	X	X	X
3.Inspeccionar posibles fisuras en bastidores, pasadores, topes				X	X	x
4.Evaluar anclajes inferiores y superiores				X	X	x
5.Inspeccionar pernos sujetadores			X	X	X	x
SISTEMA HIDRAULICO	REALIZADO	FRECUENCIA (H)				
		INSPECCION	200	500	1000	2000
1.Evaluar posibles fugas en los cilindros hidráulicos		x	X	X	X	x
2.Inspeccionar estado de mangueras por roce, fugas y cambiar si es necesario		x	X	X	X	x
3.Ajustar abrazaderas de tuberías y mangueras		x	X	X	X	x
4.Inspecciona bombas principales y auxiliares por posibles fugas			X	X	X	x

5.Inspeccionar fugas en bloques de frenos				X	X	x
6.Reemplazar filtros hidráulicos de piloto				X	X	x
7.Reemplazar filtros hidráulicos de retomo				X	X	X
8.Reemplazar respiradero del tanque hidráulico					X	X
9.Verificar nivel de aceite hidráulico		X	X	X	X	x
10.Reemplazar filtro de la presión piloto				X	X	x
11.Reemplazar filtro de alta presión de mando de ventilador de radiador de motor Diesel				x	X	x
12.Verificar presión de acumulador		X	X	X	X	x
13.Extraer muestra de aceite hidráulico para el análisis espectrofotométrico y conteo de partículas			X	X	X	x
14.Realizar monitoreo periódico de temperaturas de cilindro hidráulico			X	X	X	x
15.Realizar monitoreo periódico de la temperatura en las bombas principales				X	X	x
16.Realizar monitoreo periódico de la temperatura de los motores hidráulicos de enfriamiento			X	X	X	x
17.Revisión periódica de las bases de las tuberías de alta presión para evitar vibración		X	X	X	X	x

18.Revisión de clip y abrazaderas de maguera pilotaje		X	X	X	X	x
19.Revisar ajuste de los pernos de válvula principales		X	X	X	X	x
20.Verificar estado de soportes y fijaciones de las mangueras de alta presión		X	X	X	X	x
21.Limpieza de enfriador de aceite				x	X	x

ANEXO 4 CICLO DE MEJORA CONTINUA

CICLO DE MEJORA CONTINUA - E. DEMING			
Ciclo MC	Item	Objetivos	Responsable
P	1	Política y objetivos	Todos los miembros de la empresa
	2	Inventario de activos (dossier técnico: ficha técnica, manuales, planos, catálogos, etc.)	Ingeniero supervisor
	3	Análisis de la criticidad de activos (con matriz)-Excel	Ingeniero supervisor
	4	Análisis de los modos de falla (RCM) para equipos críticos-Excel	Ingeniero supervisor
	5	Establecer el plan de mantenimiento Excel	Ingeniero supervisor
	6	Planificación de los recursos Excel	Ingeniero supervisor
	7	Programación del mantenimiento Excel	Ingeniero supervisor
	8	Control de componentes de los activos-Excel	Ingeniero supervisor
	9	Elaboración de presupuesto-Sistema EP	Ingeniero supervisor
E	1	Ejecución de plan de mantenimiento preventivo y predictivo.	Técnicos
	2	Ejecución de reparación y correctivos.	Técnicos
	3	Registro de mantenimiento	Técnicos
	4	Elaboración y control de backlog - Excel	Técnicos
V	1	Historial del mantenimiento	Ingeniero supervisor
	2	Análisis de falla - Excel	Ingeniero supervisor
	3	Análisis de confiabilidad y mantenibilidad del activo crítico - Excel	Ingeniero supervisor
	4	Análisis del costo de ciclo de vida del activo	Ingeniero supervisor
	5	Análisis de mediciones críticas de predictivo (vibración, termografía, aceite)	Ingeniero supervisor-técnicos
	6	Indicadores de mantenimiento y gestión de activos - Excel	Ingeniero supervisor
A	7	Auditoría de mantenimiento - Excel	Ingeniero supervisor
	1	Informe de reemplazo u del activo	Ingeniero supervisor
	2	Informe, cambios o permanencias de frecuencia del plan de mantenimiento	Ingeniero supervisor
	3	Informe de mejoras de los planes de mantenimiento	Ingeniero supervisor
	4	Estrategias y planes de acción de mantenimiento	Ingeniero supervisor