



UPA Universidad
Politécnica Amazónica

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS

Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO**

Autor:

Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidia

<https://orcid.org/0009-0003-2698-3279>

Asesor:

Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez

<https://orcid.org/0000-0002-9018-9569>

Registro: UPA-PITIM0017

Bagua Grande – Perú

2023

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mis padres que me apoyaron en todo momento y contribuyeron en momentos malos y momentos buenos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades y así poder salir adelante y no morir en el intento.

También quiero dedicar este trabajo a mis hermanos, hermanas, amigos, que me ayudaron en todo momento para que este trabajo se haga realidad.

Segundo Romelio.

Agradecimiento

Al Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez, por sus grandes enseñanzas, parte de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracteriza.

A la Universidad Politécnica de la Amazonia, y sus docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, por las buenas enseñanzas y valores adquiridos, por sus palabras sabias, y sus conocimientos.

El autor.

Autoridades universitarias

Rector : Dr. Ever Salome Lázaro Bazán

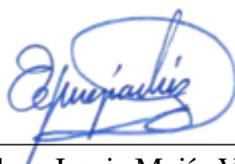
Coordinador escuela profesional : Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez

Visto bueno del asesor

Yo, Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez, docente y coordinador de Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Politécnica Amazónica, dejo constancia de haber asesorado al Tesista, Segundo Romelio Coronel Gavidia en su tesis titulada “Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca”. Asimismo, se deja constancia que se ha levantado las observaciones señaladas en las revisiones previas a esta presentación.

Por lo indicado, doy fe y visto bueno.

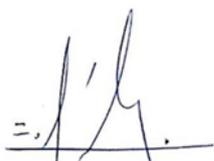
Bagua Grande, 18 de abril del 2023



Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez

Asesor

Jurado evaluador



Dr. Ever Salomé Lázaro Bazán
Presidente Jurado



Mg. Ing. Juan José Castañeda León
Secretario Jurado



Mg. Ing. Mario Felix Olivera Aldana
Vocal Jurado

Declaración jurada de no plagio

Yo, Segundo Romelio Coronel Gavidia, identificado con DNI. 48033317, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Politécnica Amazónica.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor de la tesis titulada: “Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca”.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra los derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.
6. Se ha respetado las consideraciones éticas en la investigación.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda la responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir todas las cargas pecuniarias que pudiera derivarse para la Universidad Politécnica Amazónica en favor de terceros por motivos de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del cumplimiento de lo declarado, y que encontraren causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias o sanciones civiles y penales que de mi acción deriven.

Bagua Grande, 18 de abril del 2023



Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidia

DNI. 48033317

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Autoridades universitarias	iv
Visto bueno del asesor	v
Jurado evaluador.....	vi
Declaración jurada de no plagio	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
I. Introducción	1
1.1 Realidad problemática.....	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Justificación.....	2
1.3.1 Justificación social.....	2
1.3.2 Justificación económica.....	3
1.3.3 Justificación ambiental	3
1.3.4 Justificación científica	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo general.....	4
1.5.2 Objetivos específicos	4
II. Marco teórico.....	5
2.1 Antecedentes de la investigación.....	5
2.2 Bases teóricas.....	7
2.2.1 Evaluación de confiabilidad	7
2.2.2 Disponibilidad operacional.....	10
2.3 Definición de términos	12
III. Materiales y métodos	14
3.1 Diseño de investigación	14
3.2 Población, muestra y muestro	14

3.3	Determinación de las variables	14
3.4	Fuentes de información	15
3.5	Métodos.....	15
3.6	Técnicas e instrumentos	15
3.7	Procedimiento.....	15
3.8	Análisis estadístico.....	16
3.9	Consideraciones éticas	16
IV.	Resultados.....	17
4.1	Determinación de fallos de la maquinaria pesada.	17
4.2	Análisis de la prioridad de fallos de la maquinaria pesada.....	19
4.3	Determinación de la confiabilidad mediante modelo de Weibull de las máquinas más críticas.....	20
4.3.1	Resultados de cálculo de confiabilidad mediante modelo de Weibull de la retroexcavadora (420E).....	22
4.3.2	Resultados de cálculo de confiabilidad mediante modelo de Weibull de la excavadora (210G Lx).....	24
4.4	Determinación de la disponibilidad operacional mediante modelo de Weibull de las maquinas mas criticas	27
4.4.1	Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos de reparación de la retroexcavadora (420E).	27
4.4.2	Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos entre fallas de la retroexcavadora (420E).....	28
4.4.3	Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos de reparación de la excavadora (210G Lx).	30
4.4.4	Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos entre fallas de la excavadora (210G Lx).	31
4.4.5	Resultados de cálculo del MTBF, MTTR, y disponibilidad operacional mediante modelo de Weibull de las máquinas más críticas.....	32
IV.	Discusión.....	34
	Conclusiones.....	37
	Recomendaciones	39
	Referencias bibliográficas.....	40
	Anexos	43

Índice de tablas

Tabla 1	Tiempos de operación y de reparación de maquinaria pesada	17
Tabla 2	Calculo de análisis de Pareto de tiempos de falla para la maquinaria pesada.....	19
Tabla 3	Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos de operación de la retroexcavadora (420E)	23
Tabla 4	Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para los tiempos de operación de la excavadora (210G Lx)	25
Tabla 5	Resumen de resultados del cálculo de la confiabilidad para un periodo operativos de las maquinas más críticas	26
Tabla 6	Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos de reparación de la retroexcavadora (420E)	27
Tabla 7	Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos entre fallos de la retroexcavadora (420E)	29
Tabla 8	Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos de reparación de la excavadora (210G Lx).....	30
Tabla 9	Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos entre fallas de la excavadora (210G Lx)	31
Tabla 10	Resultados del cálculo de la disponibilidad operacional de las maquinas más críticas	33

Índice de figuras

Figura 1	Diagrama de tiempo de operación y reparación	11
Figura 2	Diseño de la investigación.....	14
Figura 3	Procedimiento de cálculo para la investigación	16
Figura 4	Diagrama de Pareto de tiempos de falla para la maquinaria pesada	20
Figura 5	Ecuación lineal de regresión para tiempos de operación de la retroexcavadora (420E)	23
Figura 6	Comportamiento de la confiabilidad y desconfiabilidad para diferentes periodos operativos de la retroexcavadora (420E)	24
Figura 7	Ecuación lineal de regresión para tiempos de operación de la excavadora (210GLx)	25
Figura 8	Comportamiento de la confiabilidad y desconfiabilidad para diferentes periodos operativos de la excavadora (210GLx)	26
Figura 9	Ecuación lineal de regresión para tiempos de reparación de la retroexcavadora (420E)	28
Figura 10	Ecuación lineal de regresión para tiempos entre fallos de la retroexcavadora (420E)	29
Figura 11	Ecuación lineal de regresión para tiempos de reparación de la excavadora (210GLx)	30
Figura 12	Ecuación lineal de regresión para tiempos entre fallas de la excavadora (210GLx)	31

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio-Cajamarca. Es del tipo básica, con un diseño de investigación descriptiva correlacional causal, no experimental. Primero se determinó los fallos de la maquinaria pesada. Luego se analizó la prioridad de fallos mediante el diagrama de Pareto para determinar las máquinas más críticas. Así mismo, se determinó la confiabilidad mediante distribución de Weibull, se utilizó los tiempos de operación hasta la falla de las máquinas más críticas, y la determinación de los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados; la confiabilidad de la retroexcavadora (420E) dentro de un periodo operativo de 176 horas, alcanzó el 46 %; mientras que la excavadora (210G Lx), para el mismo periodo de evaluación llega a un 45 %. Para la disponibilidad operacional mediante distribución de Weibull, primero se determinaron los parámetros con la distribución de Weibull α y β , mediante el método de mínimos cuadrados; también se determinó el tiempo medio entre fallos (MTBF), y el tiempo medio para reparar (MTTR) en cada máquina crítica; la retroexcavadora (420E) tiene una disponibilidad del 74.22 % y la excavadora (210G Lx) del 68.55 %. Se concluye que la retroexcavadora (420E) presenta una mayor confiabilidad y disponibilidad en comparación con la excavadora (210G Lx). Además el conocimiento de los indicadores es muy útil para el control, evaluación, y mejoras del mantenimiento.

Palabras clave: Confiabilidad, disponibilidad operativa, distribución Weibull, maquinaria pesada.

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the reliability through Weibull distribution for the operational availability of heavy machinery of the District Municipality of Namballe, San Ignacio-Cajamarca. It is the basic type, with a causal correlational descriptive research design, not experimental. First, falls from heavy machinery will be reduced. Then the failure priority was analyzed using the Pareto diagram to determine the most critical machines. Likewise, the reliability will be prolonged through the Weibull distribution, the operation times until the failure of the most critical machines will be improved, and the determination of the parameters of the Weibull distribution α and β , will be calculated by means of the method of least squares; the reliability of the backhoe (420E) within an operating period of 176 hours, reached 46%; while the excavator (210G Lx), for the same evaluation period reaches 45%. For operational readiness using the Weibull distribution, the parameters α and β were first determined with the Weibull distribution, using the method of least squares; the mean time between failures (MTBF) and the mean time to repair (MTTR) will also be reduced in each critical machine; the backhoe (420E) has an availability of 74.22% and the excavator (210G Lx) of 68.55%. It is concluded that the backhoe (420E) presents greater reliability and availability compared to the excavator (210G Lx). In addition, the knowledge of the indicators is very useful for the control, evaluation and improvements of maintenance.

Keywords: Reliability, operational availability, Weibull distribution, heavy machinery.

I. Introducción

1.1 Realidad problemática

La evaluación de la confiabilidad es de gran importancia para garantizar la seguridad y reducir los costos de mantenimiento del equipo. En general, la confiabilidad del equipo incluye la confiabilidad general y la confiabilidad operativa. El primero se obtiene mediante el análisis estadístico de una gran cantidad de datos de fallas del equipo y refleja la confiabilidad general del equipo a lo largo de su vida útil. Este último se obtiene a partir de la información de degradación del rendimiento del equipo, y refleja la confiabilidad en tiempo real del equipo. En el campo de la ingeniería, el equipo de lote único o de lotes pequeños es ampliamente utilizado, y los datos de falla son muy escasos en este caso, por lo que el método estadístico tradicional no es adecuado para la evaluación de confiabilidad de este tipo de equipo mecánico. En cambio, la confiabilidad operativa es más de importancia práctica para garantizar la seguridad de este tipo de equipos porque se puede obtener en tiempo real cuando los datos de monitoreo de condición se muestrean continuamente (Zhu et al., 2021).

Actualmente las empresas tratan de buscar nuevas estrategias para reducir costos, mejorar su productividad y eficiencia en general y tener ventaja sobre las demás organizaciones de su rubro ya que de esta manera logran cumplir con las expectativas de los clientes y destacar en la industria. El mantenimiento es una actividad de fundamental desarrollo para monitorear si el activo fijo operable y si una compañía no vela ni mejora estas acciones, se verá reducida por pérdidas imprevistas de parte de la maquinaria. Dentro del contexto operativo se busca optimizar el sistema ya existente bajo el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) con el fin de mitigar las averías, fallas crónicas en las máquinas, suministrar fuentes confiables de capacidad de las máquinas, minimizar los costos de la mano de obra, aumento de la disponibilidad en al menos un 8% desde su aplicación en la compañía. En muchas empresas la maquinaria no alcanzaba los indicadores en disponibilidad y confiabilidad según las metas planteadas por el mantenimiento predictivo e indicadores de gestión del mantenimiento. El hecho de no alcanzar lo establecido, representaba una pérdida económica en la empresa (Sanchez, 2021).

Muchas de las veces por falta de datos se recurren a técnicas o modelos estadísticos que pueden simplificar el cálculo de la confiabilidad, como es la distribución exponencial o distribución normal, de acuerdo a esto se ve necesario realizar una investigación para plantear herramientas mucho más completas en cuanto al análisis de la confiabilidad, como es el caso

de la distribución de Weibull, permitiendo así abarcar un número mayor de modos de fallo considerando los tiempos de reparación y buen funcionamiento. Además, las herramientas informáticas disponibles tienen un coste asociado, que en muchas de las ocasiones se convierten en inversiones que las empresas de transporte no están dispuestas asumir (Conde y Mosquera, 2022).

El área de mantenimiento de maquinaria pesada de una empresa o entidad gubernamental es muy importante ya que es un área con un presupuesto considerablemente grande y gastos elevados lo que hace un área crítica a la hora de ahorrar costos. En la mayoría de casos el área de logística no está diseñada para contribuir con la organización, el mayor tiempo de la parada de equipos está afectada por el tiempo que el suministro, de repuestos o consumibles llega a almacenes. Los equipos y maquinaria de las últimas generaciones, vienen equipados con tecnología de última generación, con sistemas electrónicos sofisticados de control y monitoreo en tiempo real.

Analizando las distintas máquinas en conjunto con trabajadores del área de mantenimiento, se obtiene que la maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe están teniendo demasiadas fallas imprevistas lo cual genera muchas horas de mantención y baja disponibilidad operacional (horas de producción perdidas). Además, no se cuenta con una metodología eficiente para la determinación de los tipos de fallas que está teniendo la maquinaria, y para el análisis de los indicadores de confiabilidad y disponibilidad. Esta evaluación podrá dar paso a próximos estudios para que permita establecer criterios que aporten mejoras, y realizar ajustes a la estrategia de mantenimiento, implementar planes de mantenimiento preventivo, principalmente para fallas que afecten directamente la confiabilidad de la maquinaria pesada.

1.2 Formulación del problema

¿Se podrá evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación social

Se justifica socialmente, ya que los estudiantes de pre grado, pueden ampliar sus conocimientos sobre todo en el área de la estadística y la ingeniería de confiabilidad.

También se desea contribuir con el área de mantenimiento de la Municipalidad Distrital de Namballe, mediante la propuesta de evaluación de confiabilidad enfocada a reducir las intervenciones no programadas y por consiguiente incrementar la disponibilidad operacional, y el tiempo de operatividad de la maquinaria pesada, con lo cual se beneficiará el área de mantenimiento de la Municipalidad, también la población con la ejecución de obras de infraestructura y mantenimiento en el Distrito de Namballe.

1.3.2 Justificación económica

La evaluación de la confiabilidad; permite reducir el tiempo de las detenciones, y reducir las pérdidas asociadas a las mismas. La reducción de las intervenciones por falla conlleva a una reducción en los gastos de mantenimiento correctivo y al incremento de ingresos por equipo operativo, lo que se traduce en un mayor margen de ganancia para la Municipalidad Distrital de Namballe.

1.3.3 Justificación ambiental

La evaluación de la confiabilidad de la maquinaria pesada; permite la eliminación de las fallas catastróficas, permite reducir la cantidad de material desgastado (fierro) y lubricante evacuados al medio ambiente. Una mejor percepción ambiental sobre disposición de materiales desgastados, residuos de aceites y la eliminación de fallas, reduce los impactos ambientales negativos.

1.3.4 Justificación científica

Se justifica científicamente ya que aborda a mejorar conocimientos teóricos sobre modelos estadísticos en la evaluación de confiabilidad; y son muy importantes en la práctica. Los altos estándares de mantenimiento y tratamiento están íntimamente ligados a las exigencias de calidad y fiabilidad de la maquinaria pesada.

1.4 Hipótesis

Se puede evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio –Cajamarca.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio – Cajamarca.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar los fallos de la maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe.
- Analizar la prioridad de fallos de la maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe.
- Determinar la confiabilidad mediante distribución de Weibull de las máquinas más críticas de la Municipalidad Distrital de Namballe.
- Determinar la disponibilidad operacional mediante distribución de Weibull de las máquinas más críticas de la Municipalidad Distrital de Namballe.

II. Marco teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

Odeyar et al. (2022) en su investigación realizó una revisión de los métodos de análisis de fallas y confiabilidad para equipos pesados y sus componentes utilizados en minería. Para lograr un nivel de producción objetivo en las industrias mineras, todos los sistemas de máquinas y sus subsistemas deben funcionar de manera eficiente y ser confiables durante su vida útil. Las implicaciones de la falla del equipo se han vuelto más críticas con el aumento del tamaño y la complejidad de la maquinaria. La planificación adecuada del mantenimiento reduce el costo general de mantenimiento, aumenta la vida útil de la máquina y da como resultado costos optimizados del ciclo de vida. Varias técnicas se han utilizado en el pasado para predecir la confiabilidad, y siempre ha habido posibilidades de mejora de las mismas. Los investigadores están encontrando nuevos métodos para un mejor análisis de fallas y confiabilidad desde los métodos estadísticos tradicionales hasta la aplicación de inteligencia artificial. Con el avance de la Industria 4.0, la industria minera avanza constantemente hacia el enfoque de mantenimiento predictivo para corregir fallas potenciales y aumentar la confiabilidad del equipo. Este artículo intenta proporcionar una revisión exhaustiva de las diferentes técnicas estadísticas que se han aplicado para la confiabilidad y la predicción de fallas, tanto desde el punto de vista teórico como de las aplicaciones industriales.

Pulgarín (2019) en su investigación realizó una aproximación de la confiabilidad para optimizar procesos de mantenimiento y productivos con distribución Weibull. Se ha probado a lo largo de este trabajo que es factible determinar parámetros de confiabilidad utilizando la distribución Weibull, tanto para estudios de mantenimiento como para producción. Ambos estudios tienen un tratamiento de los datos diferentes, pero la concepción es la misma y basa sus resultados estadísticos en probabilidades que pueden traer ahorros significativos a las compañías que lo empleen. De ahí la importancia de la implementación de Weibull y su impacto en la vida útil dependiendo de la cantidad de fallos que pueda tener. Según los cálculos realizados por la metodología Weibull, se puede obtener una máquina obsoleta, pero no depreciada y es ahí donde se generan puntos críticos en el proceso general.

Conde y Mosquera (2022) en su tesis desarrollaron una herramienta informática, enfocada a facilitar al usuario la información y resultados necesarios para un análisis de confiabilidad mediante una distribución de Weibull, que puede ser aplicado a una flota vehicular. Al poseer los datos de mantenimiento brindados por la empresa, se pudo establecer

los diferentes modos de fallo, en distintos mantenimientos realizados los sistema de cada máquina como son el motor, transmisión, dirección, sistema eléctrico, sistema hidráulico y el chasis-carrocería, por el tamaño del historial de cada máquina, se optó por el análisis mediante un diagrama de Pareto a cada agrupación por tipo de máquina de la empresa, con resultados de mejor entendimiento y fácil estudio, del cual se obtuvo, que los tractores, cargadoras, motoniveladoras y retroexcavadoras, representan mayor criticidad y coste a la empresa. Luego de contar con los tiempos hasta un fallo, se realizó una herramienta informática en el entorno conocido como Visual Basic, dentro del programa estadístico de Excel, además del uso de macros, lo que permite realizar un análisis, filtrado y orden en los datos de tiempo hasta una falla de cada máquina, con ello la herramienta puede proporcionar datos de confiabilidad, desconfiabilidad, los parámetros Weibull, como beta (β) y eta (η), así como el tiempo medio entre fallos (MTBF), con una gráfica la tasa de fallos, esenciales para realizar un análisis de confiabilidad, la herramienta también cuenta con funciones para la organización de informes con los datos para el análisis de confiabilidad.

Sanchez (2021) en su investigación que tuvo como objetivo implementar un sistema de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) a partir del plan vigente para el equipo de maquinaria pesada en SERVI SAP. La población para el estudio son excavadoras, la muestra del estudio, se establece como la excavadora del modelo 345D L de manera estratégica. Se calcularon los índices de disponibilidad de la maquinaria, análisis de datos de vida como herramienta de RCM, sus modos de falla y la criticidad. Luego, se aplica la matriz AMEF para la identificación de fallas en sistemas y subsistemas, llegando a establecer las acciones correctivas necesarias para disminuir la frecuencia y gravedad, llegando a reducir la indisponibilidad de los subsistemas hasta un 0.3%. Par la evaluación de confiabilidad utilizó en modelo Weibull. Dentro de la evaluación económica, se obtuvo un periodo de retorno de 13 meses, con un VAN positivo, y un TIR considerable, determinando que el proyecto es viable con un período de estimación de 5 años.

Ojo et al. (2022) en su investigación analizaron la confiabilidad de un motor diésel marino Caterpillar C32 12V utilizando la distribución Weibull. El análisis se realizó con el fin de mejorar la confiabilidad del sistema de agua de refrigeración de un motor diésel marino. Se determinaron los parámetros de Weibull como el tiempo medio hasta la falla (MTTF), el tiempo medio entre fallas (MTBF), la disponibilidad y la densidad de fallas del motor diésel. Los datos se recopilaron del registro de mantenimiento de un libro de registro de un barco de la Armada de Nigeria durante un período de cuatro (4) años. Los datos se

ordenaron y clasificaron según la secuencia de falla y el tiempo de falla. Con estos datos, se calcularon los parámetros clave que determinan la confiabilidad del motor con un valor de MTBF de 1,279.65 horas, tasa de fallas de 7.8×10^{-4} y disponibilidad operativa como 0.719. Finalmente se calculó la confiabilidad del motor y se obtuvo un 95%. Los resultados del estudio revelaron que el valor calculado de la tasa de falla está dentro de la tasa de falla empírica con el resultado calculado sobre la base de la distribución de Weibull para el motor diésel. Por lo tanto, se recomienda que se realicen más estudios para determinar los intervalos para el reemplazo preventivo de las partes del subsistema y que se considere un método diferente al de la distribución Weibull para determinar la confiabilidad del sistema de enfriamiento.

Arebalo y Calle (2019) en su tesis proponen un mantenimiento basado en RCM, para la gestión de mantenimiento en la maquinaria pesada perteneciente a la Municipalidad Distrital de San José de Lourdes. Con el propósito de mantenerla en óptimas condiciones de operatividad, esta investigación inicia con el diagnóstico de la situación actual mediante la revisión de documentos, entrevistas y visitas a campo, luego realiza el análisis de criticidad de equipos, posteriormente determinan la confiabilidad de los equipos más críticos, utilizando el método Weibull. Resultando que la confiabilidad disminuye considerablemente con el transcurso del tiempo, encontrado que el sistema menos confiable es el hidráulico del cargador frontal Komatsú WA-180, con un total de 54.54 horas de vida media; el más confiable es el de inyección del cargador frontal Komatsú WA-200, haciendo un total de 178 horas de vida media.

La Municipalidad Distrital de Namballe, no cuenta con proyectos de este tipo, por lo que es de importancia evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de la maquinaria pesada de la Municipalidad, que permita establecer criterios que aporten mejoras, y realizar ajustes a la estrategia de mantenimiento, e incrementar el tiempo de operatividad de la maquinaria pesada, para la ejecución de obras de infraestructura, y mantenimiento programadas.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Evaluación de confiabilidad

La evaluación de la confiabilidad es de gran importancia para garantizar la seguridad y reducir los costos de mantenimiento del equipo. El método estadístico tradicional es ampliamente utilizado para estimar la confiabilidad de equipos masivos; sin embargo, no

puede predecir de manera eficiente la confiabilidad general de equipos de lotes pequeños o individuales debido a la falta de datos de falla (Zhu et al., 2021). La evaluación de confiabilidad es una medida de la consistencia general del ítem que se utiliza para definir una escala que, como resultado, proporciona el tamaño de la muestra, el número de ítems y las funciones e indicadores de confiabilidad (Dašić et al., 2015).

Por otra parte, la de confiabilidad se ha convertido en una técnica esencial para obtener la utilización óptima de los recursos. Las máquinas no son ideales, por lo que la falla de la máquina es inevitable. Las fallas no se pueden eliminar por completo, pero se pueden reducir en mayor medida mediante técnicas de mantenimiento efectivas. Esta técnica es efectiva cuando el costo de mantenimiento es menor. El costo es una de las partes principales del costo total de producción de la industria que varía de una industria a otra. Una gran cantidad de fallas en la industria se debe al proceso de mantenimiento no planificado. Para evitar esto, se debe seguir un proceso de mantenimiento adecuado, es decir, un mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo es el mantenimiento periódico del equipo para que pueda funcionar de manera efectiva y eficiente (Gaurav et al., 2019).

Confiabilidad

La confiabilidad se puede observar como un elemento con una probabilidad de funcionar a una tasa sin cambios manteniendo su función sin fallos en las condiciones declaradas durante un tiempo especificado (Dašić et al., 2015). La confiabilidad se refiere a la probabilidad de que un sistema cumpla con los estándares de rendimiento deseados al generar resultados durante un tiempo específico cuando se usa en condiciones específicas. La confiabilidad de los componentes es una función del tiempo y siempre se mide en un tiempo de funcionamiento específico. La operación confiable es interrumpida o terminada por fallas. Una falla es un evento que resulta en la incapacidad de completar los deberes requeridos y cumplir con los requisitos. La definición teórica de confiabilidad es (Confiabilidad = 1 – Probabilidad de falla), dada por $R(t)$. La disponibilidad y el mantenimiento están relacionados con la confiabilidad y se definen como componentes esenciales de la misma (Odeyar et al., 2022).

Por otra parte Ahmadi et al. (2019), define que la confiabilidad es la capacidad de un sistema para realizar una tarea en las condiciones dadas y en un intervalo de tiempo específico. Cuando un sistema puede realizar la tarea especificada en más tiempo, es más confiable. Por lo tanto, identificar las diferentes condiciones predecibles y modos de

operación, así como el uso y no uso de los subsistemas, incluidos el sistema, el equipo, los componentes, etc., son esenciales en la fase de especificación requerida para el diseño del sistema. Si la probabilidad de falla de un elemento en el intervalo de tiempo de cero a t se muestra mediante $F(t)$, dado que la función $F(t)$ es la función de falta de confiabilidad. La confiabilidad se expresa como la Ecuación (1).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1)$$

Donde, $R(t)$ es la confiabilidad en el tiempo t , y $f(t)$ representa la función de densidad de probabilidad de la falla.

Distribución de Weibull

En la evaluación de la confiabilidad de los equipos, el primer paso es asumir la forma de distribución de probabilidad del cumplimiento de la vida útil del equipo, sobre la base de la cual se utiliza la información de la muestra para evaluar los parámetros de distribución y luego calcular los indicadores de confiabilidad. La distribución de la vida es la base de la investigación de confiabilidad. Después de años de desarrollo, las distribuciones de vida comúnmente utilizadas incluyen la distribución exponencial, la distribución gamma, la distribución de Weibull y la distribución lognormal. Este modelo Weibull es como una cadena en la que muchos anillos están conectados en serie. Cuando ambos extremos están sujetos a tensión, cualquiera de los anillos puede romperse, la cadena fallará y la falla de la cadena ocurrirá en el eslabón más vulnerable. Por lo tanto, la vida útil de las unidades, los componentes, los dispositivos y los equipos que no funcionan correctamente debido a una falla parcial se puede considerar que se aproxima a la distribución de Weibull. La mayoría de los productos electrónicos, mecánicos y eléctricos (como cojinetes, generadores, bombas hidráulicas y materiales) están sujetos a la distribución de Weibull (Zhang et al., 2019).

El modelo de distribución de Weibull tres parámetros, cuenta con un parámetro de forma β , también conocido como la pendiente de Weibull, α que es un parámetro de escala, y γ es el parámetro de posición o ubicación mayores que 0. Cuando el Weibull es de dos parámetros, cuenta con parámetro de forma β , y α parámetro de escala mayores que 0 (Pascale et al., 2017). La distribución de Weibull, ampliamente utilizada en el análisis de datos de vida, se define matemáticamente por su ecuación PDF (función de densidad de probabilidad), Ecuación (2).

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^\beta} \quad (2)$$

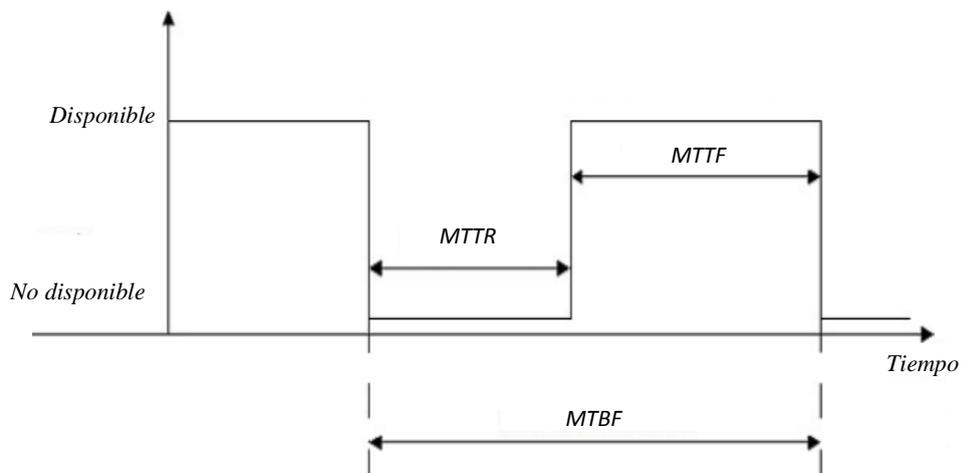
2.2.2 Disponibilidad operacional

La disponibilidad es la probabilidad de que una pieza de un equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que se usa de acuerdo con las condiciones especificadas y en un entorno ideal (Ahmadi et al., 2019).

Cuando la definición general de disponibilidad se modifica para asumir soporte ideal (es decir, ilimitado repuestos, sin demoras, etc.) y solo se consideran fallas relacionadas con el diseño o la fabricación, tenemos disponibilidad inherente (Di). Di refleja el nivel de confiabilidad y mantenibilidad (R&M) logrado en el diseño y realizado a través de los procesos de fabricación, ensamblaje y, en algunos casos, instalación. Cuando se considera un entorno de soporte realista y todas las acciones de mantenimiento, incluso aquellos no requeridos como resultado de fallas relacionadas con el diseño o la fabricación, tenemos disponibilidad operativa (Do). Do es una función de confiabilidad, mantenibilidad y soporte. Se debe hacer todo lo posible para considerar explícitamente cada elemento de Do en el desarrollo temprano y durante todo el ciclo de vida del sistema. Se debe tener en cuenta dos cosas importantes; en primer lugar, la disponibilidad operacional es un elemento clave para determinar la preparación del sistema y un objetivo de compatibilidad. En segundo lugar, el diseño del sistema no determina únicamente Do , sino que dicta un nivel máximo de disponibilidad basado únicamente en los niveles de R&M diseñados. La confiabilidad a menudo se expresa en términos de tiempo medio entre fallas (MTBF) y la mantenibilidad en términos de tiempo medio de reparación (MTTR) (OPAH, s. f.).

Figura 1

Diagrama de tiempo de operación y reparación



Nota. Adecuado de (Magalhães, 2015).

Mantenimiento

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipo o sistema, en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas. Entendiendo como función cualquier actividad que un componente, equipo o sistema desempeña, bajo el punto de vista operacional (Mesa et al., 2006).

Cualquier estrategia de mantenimiento debe minimizar las tasas de falla del equipo, mejorar la confiabilidad del equipo, prolongar la vida útil del equipo y reducir los costos de mantenimiento. Muchos indicadores clave de rendimiento (KPI) se utilizan para monitorear las tendencias a largo plazo en la confiabilidad y el desempeño del mantenimiento. Estos KPI ayudan a comprender si todas las modificaciones pequeñas y grandes en las prácticas de mantenimiento y los cambios en el sistema están teniendo el efecto deseado con el tiempo. El tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio hasta la falla (MTTF) son dos KPI esenciales para determinar la confiabilidad y las fallas del sistema. Una estrategia de mantenimiento y políticas de confiabilidad exitosas conducen a la resolución de problemas que provocan fallas en los equipos y muestran una tendencia de rendimiento cada vez mayor que se estabiliza en los niveles de referencia de la industria (Odeyar et al., 2022).

Maquinaria pesada

Maquinaria pesada se refiere a vehículos pesados que están diseñados específicamente para tareas de construcción y movimiento de tierras. Lo que hace que las cosas sean un poco ambiguas es que se usan muchos términos para describir equipos pesados, incluidas máquinas pesadas, camiones pesados, equipos de construcción, equipos de ingeniería, vehículos pesados e incluso sistemas hidráulicos pesados. No importa qué término se use, incluye máquinas como: Tractor de oruga, cargador frontal, excavadoras, rodillos compactador, retroexcavadoras, camión de basura, montacargas todo terreno. De manera crucial, la mayoría de los equipos pesados en uso hoy en día requieren al menos cierto nivel de habilidad y capacitación operativa. En algunos casos, los operadores de equipos pesados deben obtener una certificación, lo que ayuda a reducir los accidentes. Como puede imaginar, las máquinas pesadas pueden ser costosas de poseer y operar. Con márgenes de ganancia ajustados en proyectos de construcción, algunas empresas optan por alquilar para usar en ciertos proyectos. La excavación puede clasificarse de acuerdo con el propósito del trabajo, como desmonte, caminos, drenajes, puentes, canales y cimiento. Las máquinas utilizadas en el movimiento de tierras son los excavadores, cargadores, traíllas, motoniveladoras, compactadores y camiones. Cada uno de ellos con el objetivo de poder transportar o extraer los terrenos, para luego conformar la obra deseada (Ramirez, 2001).

2.3 Definición de términos

Evaluación de confiabilidad. La evaluación de la confiabilidad es de gran importancia para garantizar la seguridad y reducir los costos de mantenimiento del equipo (Zhu et al., 2021)

Confiabilidad. La confiabilidad es la capacidad de un sistema para realizar una tarea en las condiciones dadas y en un intervalo de tiempo específico (Ahmadi et al., 2019).

Distribución de Weibull. Es una de las herramientas más utilizadas en mantenimiento para estimaciones de probabilidad de falla, en este caso, es usada en relación a las fallas aparecidas en equipos de alta criticidad. Tiene la ventaja de ser muy flexible y adaptable a una variedad de observaciones experimentales (Warden, 2013).

Fallo. La terminación de la capacidad de un elemento para realizar una función requerida (Furuly, 2012).

Tiempo medio hasta la falla (MTBF). La expectativa del tiempo medio entre fallas (Ahmadi et al., 2019).

Tiempo medio hasta la falla (MTTF). La expectativa del tiempo hasta el fallo (Furuly, 2012).

Tiempo medio de reparación (MTTR). La expectativa del tiempo de restauración (Furuly, 2012).

Disponibilidad operacional. Es la probabilidad de que una pieza de un equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que se usa de acuerdo con las condiciones especificadas y en un entorno ideal. Asimismo la disponibilidad operacional es un elemento clave para determinar la preparación del sistema y un objetivo de compatibilidad (Ahmadi et al., 2019).

Mantenimiento. El mantenimiento se define como el conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipo o sistema, en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas (Mesa et al., 2006).

Maquinaria pesada. Maquinaria pesada se refiere a vehículos pesados que están diseñados específicamente para tareas de construcción y movimiento de tierras. Maquinas como tractor de oruga, cargador frontal, excavadoras, rodillos compactador, retroexcavadoras, camión de basura, montacargas todo terreno, etc. (Ramirez, 2001).

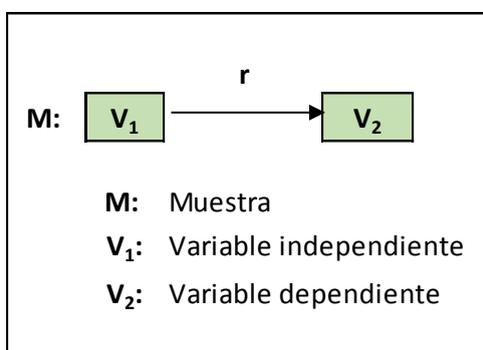
III. Materiales y métodos

3.1 Diseño de investigación

El tipo de investigación es básica, y un diseño de investigación descriptiva correlacional causal, no experimental. Ñaupas et al. (2018) la investigación descriptiva correlacional causal, describen relación entre dos o más variables en un momento determinado, se trata también de descripciones de sus relaciones.

Figura 2

Diseño de la investigación



Nota. Diseño de investigación descriptiva correlacional causal.

3.2 Población, muestra y muestro

Según Ñaupas et al.(2018), la población se refiere al universo, conjunto o totalidad de elementos sobre los que se investiga o hacen estudios. Así mismo menciona que la muestra es una parte o subconjunto de elementos que se seleccionan previamente de una población para realizar un estudio y se obtiene por muestreo, para la investigación se consideró un muestreo no probabilístico a conveniencia del investigador.

- Población: Maquinaria de la Municipalidad Distrital de Namballe.
- Muestra: Maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe 2021-2022.

3.3 Determinación de las variables

- Variable independiente: Evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull.
- Variable dependiente: Disponibilidad operacional.

3.4 Fuentes de información

Las fuentes de información fueron historial de fallos (horas de operación y horas de reparación) de maquinaria pesada, obtenidos del área de maestranza de la Municipalidad Distrital de Namballe. Además, se obtuvo información de modelos estadísticos para cálculos de confiabilidad y disponibilidad operacional, y de libros especializados en tópicos o temas tratados.

3.5 Métodos

El método que se utilizó para el cumplimiento del objetivo es el modelo de distribución de Weibull (2 parámetros), y el método de mínimos cuadrados para la determinación de los parámetros de forma y escala; que es el modelo probabilístico más utilizado en la evaluación y cálculos de ingeniería, por ser una distribución flexible y capaz de adaptarse a diferentes resultados. Según Zamora et al.(2022), el método de Weibull es muy utilizado en el análisis y determinación de indicadores de mantenimiento (confiabilidad y disponibilidad).

3.6 Técnicas e instrumentos

Las fichas de observación permiten al investigador registrar la situación o los eventos observados durante la investigación. Los investigadores a menudo deben usar cámaras de video para registrar eventos que no son fácilmente visibles. También está el análisis de documental, donde el investigador recopila información de cuadros, informes, etc. No es necesaria la revisión estadística del caso por expertos (Gonzales, 2021). Para la investigación se utilizó la técnica de observación y análisis documental.

- Técnicas de observación.

Instrumento: Guía de observación de datos técnicos y operatividad de maquinaria pesada.

- Técnicas análisis documental.

Instrumento: Ficha de registro de fallas de maquinaria pesada.

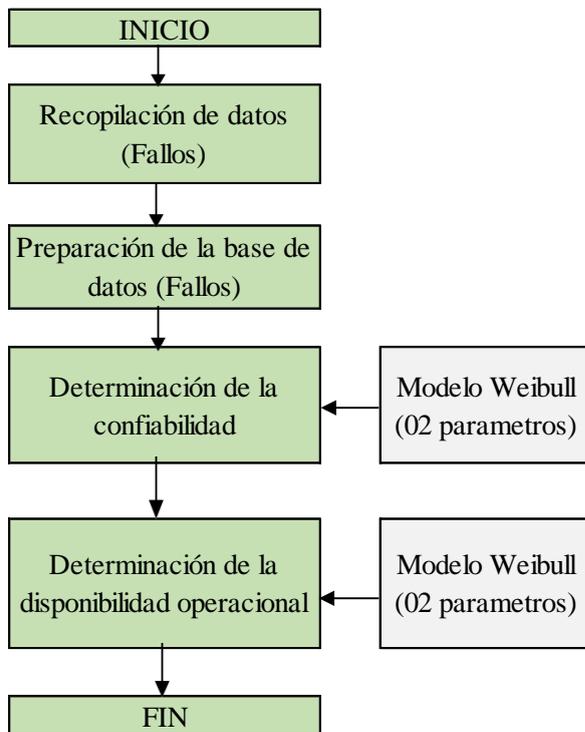
3.7 Procedimiento

Para evaluar los índices de confiabilidad y disponibilidad operativa de la maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, se utilizó el Excel y el modelo de

distribución de Weibull en sus diferentes etapas. El procedimiento de cálculo de la investigación se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Procedimiento de cálculo para la investigación



3.8 Análisis estadístico

El análisis estadístico está basada en el modelo de la distribución de Weibull. Para la alineación de parámetros del modelo se realizó por el método de mínimos cuadrados, además la ecuación lineal que representa al conjunto de los datos, y el r^2 que mide es el grado de linealidad de los datos. El análisis estadístico se realizó con ayuda del software Excel.

3.9 Consideraciones éticas

Se tomó en cuenta las pautas éticas internacionales para la investigación. La tesis no es plagiada ni total ni parcialmente, por lo que se respetaron los estándares internacionales de citación y referencias de las fuentes consultadas. Por otra parte, la tesis no infringe los derechos de terceros. También se cuenta con la autorización de la empresa o Entidad para realizar la investigación.

IV. Resultados

4.1 Determinación de fallos de la maquinaria pesada.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron los datos operativos y de reparación de la maquinaria pesada de Municipalidad Distrital de Namballe, cuenta con (01) tractor oruga, (01) retroexcavadora, (01) excavadora, (01) motoniveldora, (01) cargador frontal, y (01) rodillo compactador; utilizada para rehabilitación y obras de infraestructura.

La Municipalidad Distrital de Namballe, tiene el área de maestranza, donde se organizan, planifican y controlan algunas actividades de mantenimiento preventivo; también se registran los mantenimientos correctivos. En relación a lo expuesto, para la determinación de los indicadores de mantenimiento, se trabajó con la base de datos obtenida del área de maestranza, utilizando primordialmente los registros de mantenimientos correctivos ocurridos durante el periodo operativo 10 de febrero del 2021 a 27 junio del 2022. En la Tabla 1, se presentan los tiempos de operación y reparación de la maquinaria pesada.

Tabla 1

Tiempos de operación y de reparación de maquinaria pesada

Equipo/maquinaria		Descripción de la falla	N° Fallas	Horómetro (horas)	Fecha	TO (horas)	TR (horas)
Descripción	Modelo/serie						
Tractor oruga	D6M	- La bomba de refrigeración presento desgaste en los rodamientos, desgaste en el rotor.	1	10890	12/06/2021		40
		- La manguera presento fugas de aceite, debido al rozamiento con parte del chasis de la máquina.	1	11076	15/09/2021	186	30
		- La faja del alternador estaba en mal estado debido a las horas de operación.	1	11350	20/11/2021	274	25
		- La falla en los componentes de la caja de transmisión se dio debido al tiempo de trabajo. De acuerdo con el manual del fabricante recomienda la reparación general después de cumplir las 12000 horas de trabajo.	1	11586	13/01/2022	236	240
		- La falla en el sistema de dirección y frenos, se dio debido a la variación de energía que envía el ECM (computadora) a las electroválvulas.	1	11900	12/06/2022	314	120

		Fecha de corte (evaluación)	11900	27/06/2022			
Retroexcavadora	420E	- Fugas de aceite hidráulico por los controles, mal funcionamiento de las válvulas y orines en mal estado.	1	9750	10/02/2021	120	
		- Las fallas que se encontraron son fugas de aceite por los retenes y orines, desgaste interno de la bomba esto debido al tiempo de trabajo.	1	9976	19/04/2021	226	90
		- Terminales de dirección en mal estado presento desgaste y rotura.	1	9998	05/06/2021	22	67
		- Las mangueras del sistema hidráulico de los cilindros del brazo de la retroexcavadora. Se encuentran en mal estado debido a las horas de trabajo.	1	10056	09/08/2021	58	35
		- La falla en el motor se dio debido al recalentamiento que sufrió debido a la rotura de una manguera de refrigeración, lo cual provoco que los componentes como bielas, pistones árbol de levas se deformaran.	1	10126	20/10/2021	70	240
		- Turbo en mal estado debido a las fugas de aceite que presenta, desgaste de alavés de la turbina.	1	10520	05/01/2022	394	60
		- Cambio de retenes, oring y rodamientos de mandos finales posteriores y delanteros.	1	10830	15/04/2022	310	50
		- Fecha de corte (evaluación)		11166	27/06/2022	336	
Excavadora	210G Lx	- El turbo presento fallas en la inyección de aire de admisión debido a los alaves de la turbina en mal estado, y la mala lubricación fue la causa de cambio del turbo.	1	4850	10/02/2021	280	
		- El sistema de rodamiento presenta desgaste en la cadena, rodillos, sprocket, rueda guía, esto debido al momento de trasladar la maquina no utilizan una cama baja.	1	4920	18/06/2021	70	72
		- El sistema de recirculación de gases de escape (EGR) lleva un intercambiador de calor lo cual presentaba fugas internas de refrigerante.	1	4970	10/09/2021	50	176
		- Desgaste en el cucharón de la excavadora JOHN DEERE debido al trabajo en rocas y el tiempo de operación de la máquina.	1	5020	16/12/2021	50	48
		- Fecha de corte (evaluación)		5900	27/06/2022	880	

Motoniveladora	120K	- Reparación de mandos finales lado izquierdo de la motoniveladora 120k, la falla se dio en los discos de frenos y en los rodamientos debido a las horas de trabajo.	1	8686	04/01/2022		72
		- Reparación de mandos finales lado izquierdo, presento desgaste prematuro de los repuestos como discos, rodamientos, los repuestos que utilizaron fueron alternativos.	1	9025	02/03/2022	339	104
Cargador frontal	924K	- Fecha de corte (evaluación)		9665	27/06/2022	640	
		- La falla se presentó activándose un código en el tablero lo cual un sensor de temperatura estaba fallando.	1	2523	02/09/2021	1472	80
Rodillo compactador	512 SEM	- Fecha de corte (evaluación)		3907	27/06/2022	1384	
		- El desgaste del yugo de articulación se dio debido a la falta de lubricación (no engrasaron).	1	1200	18/11/2021	1200	22
		- Fecha de corte (evaluación)		2336	27/06/2022	1136	

Nota. Adecuado del área de Maestranza. TO: Tiempo de operación; TR: Tiempo para reparar.

4.2 Análisis de la prioridad de fallos de la maquinaria pesada

Para el análisis de la prioridad de fallos de la maquinaria pesada, se utilizó el diagrama de Pareto. Es ampliamente conocido el uso, como herramienta de mejora en operaciones y mantenimiento, pero su uso no está circunscrito a estas áreas, es una herramienta de uso general. Se conoce como la regla 80/20. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20 % de las causas resuelven el 80 % del problema y el 80 % de las causas solo resuelven el 20 % del problema.

Tabla 2

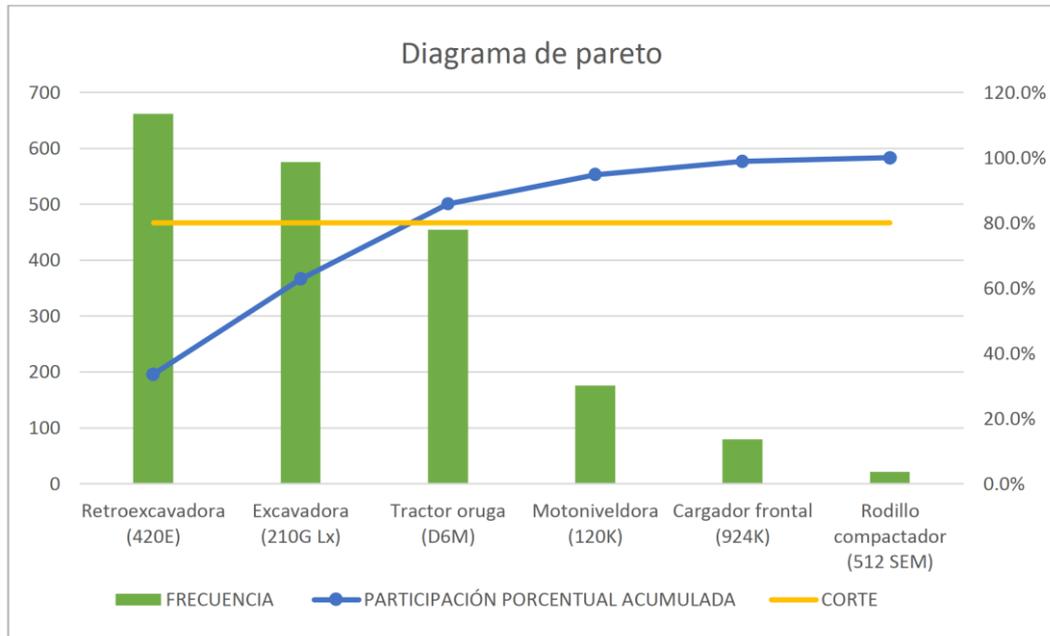
Calculo de análisis de Pareto de tiempos de falla para la maquinaria pesada

N°	Maquinaria pesada	Incidencias ordenadas	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1	Retroexcavadora (420E)	662	33.59%	33.59%
2	Excavadora (210G Lx)	576	29.22%	62.81%
3	Tractor oruga (D6M)	455	23.08%	85.90%
4	Motoniveladora (120K)	176	8.93%	94.82%
5	Cargador frontal (924K)	80	4.06%	98.88%
6	Rodillo compactador (512 SEM)	22	1.12%	100.00%

Nota. Se utilizó los tiempos de reparación en horas (TR).

Figura 4

Diagrama de Pareto de tiempos de falla para la maquinaria pesada



Nota. Se utilizó los tiempos de reparación en horas (TR).

Según la Figura 4, existe el 20% de máquinas, que provocan el 80 % de tiempo total de reparaciones producto de eventos de falla.

4.3 Determinación de la confiabilidad mediante modelo de Weibull de las máquinas más críticas.

El método a utilizar para el cumplimiento del objetivo es la distribución de Weibull; que es el modelo probabilístico más utilizado en análisis y cálculos de ingeniería, por ser una distribución flexible y capaz de adaptarse a diferentes resultados. El método de Weibull es muy utilizado en el análisis y determinación de indicadores de mantenimiento (confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad), además permite identificar y simular la etapa de transición operativa en el que se encuentran equipos o componentes mecánicos. La distribución de Weibull se encuentra conformado por tres parámetros que se ajustan y moldean a diferentes resultados experimentales y estos son; el parámetro alfa o de escala (α); beta o de forma (β) y gamma o de localización (γ) el mismo que es considerado ($\gamma = 0$) debido a que es la probabilidad de que no existan fallos en el sistema. El parámetro de forma posibilita a la

distribución de Weibull que se acomode a las tres etapas de vida operativa de un equipo (infancia, vida útil y vejez) mediante el gráfico de la curva de Davies (Zamora et al., 2022).

La función de densidad de probabilidad de Weibull de 2 parámetros $f(t)$ se muestra en la Ecuación (3).

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (3)$$

La distribución Weibull, permite el cálculo de la confiabilidad mediante Ecuación (4).

$$R(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (4)$$

Donde, $R(t)$ es la confiabilidad, e base logaritmo natural, t tiempo a evaluar, α parámetro de escala, y β parámetro de forma.

La Tabla 1, presentan los tiempos operativos (TO) y los tiempos de reparación de fallos (TR), los mismos que son ineludibles en la determinación de los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calculan mediante el método de Mínimos Cuadrados.

Alienación de parámetros por método de Mínimos Cuadrados

En la aplicación del Método de Mínimos Cuadrados primero se ordenaron los datos en forma descendente, luego se procedió a calcular un estimador no paramétrico referente al orden de las fallas denominado rango de mediana por medio de la ecuación de Bernard, estos valores utilizados en el trazo de la recta representativa del método de mínimos cuadrados; después se transformó la función de distribución acumulativa en una ecuación lineal de regresión (Zamora et al., 2022).

En primer lugar, es necesario clasificar los valores individuales en orden ascendente $i = 1, 2, 3, \dots$. Para la estimación de la distribución, se utiliza la función $F(t)$ como estadístico de orden con el orden de la mediana. Por lo general, la aproximación de Bernard se utiliza para calcular el orden de la mediana.

$$F_i(t) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (5)$$

Donde, $F_i(t)$ estimación del valor mediano; i rango de números de serie de tiempo hasta la falla t ; n número total de fallas.

Luego, se utiliza la regresión lineal para obtener los resultados de la distribución de Weibull. Este representa la aproximación de valores por el ajuste de mínimos cuadrados de una línea recta. Las siguientes relaciones representan la derivación de los cálculos del parámetro de forma β y el parámetro de escala α de la distribución de Weibull a partir de la función de distribución $F(t)$. Aplicando logaritmos naturales y propiedad exponencial de logaritmos, se tiene la Ecuación (7).

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (6)$$

$$\ln\{\ln[1/(1 - F(t))]\} = \beta \ln(t) - \beta \ln \alpha \quad (7)$$

Después de simples arreglos matemáticos y dos logaritmos, la función de distribución $F(t)$ se puede transformar en una ecuación de línea.

$$y = \beta x - b \quad (8)$$

La cual es una recta de regresión.

$$y = \ln\{\ln[1/(1 - F(t))]\}, \quad x = \beta \ln(t), \quad b = \beta \ln \alpha \quad (9)$$

De la Ecuación (8), se concluye que el parámetro de forma, β es la pendiente de la recta de regresión. Asimismo de la Ecuación (9), se observa que el parámetro de escala, α está en función del intercepto b de la recta de regresión y del parámetro de escala; por lo tanto, por definición de logaritmos se tiene:

$$\alpha = e^{-\frac{b}{\beta}} \quad (10)$$

4.3.1 Resultados de cálculo de confiabilidad mediante modelo de Weibull de la retroexcavadora (420E)

Los datos proporcionados en la Tabla 3, representan la aplicación del Método de los Mínimos Cuadrados, en donde se calcularon los valores de la abscisa (x) y ordenada (y), de cada tiempo operativo de retroexcavadora (420E), los mismos que se utilizaron para la representación gráfica del método, Figura 5.

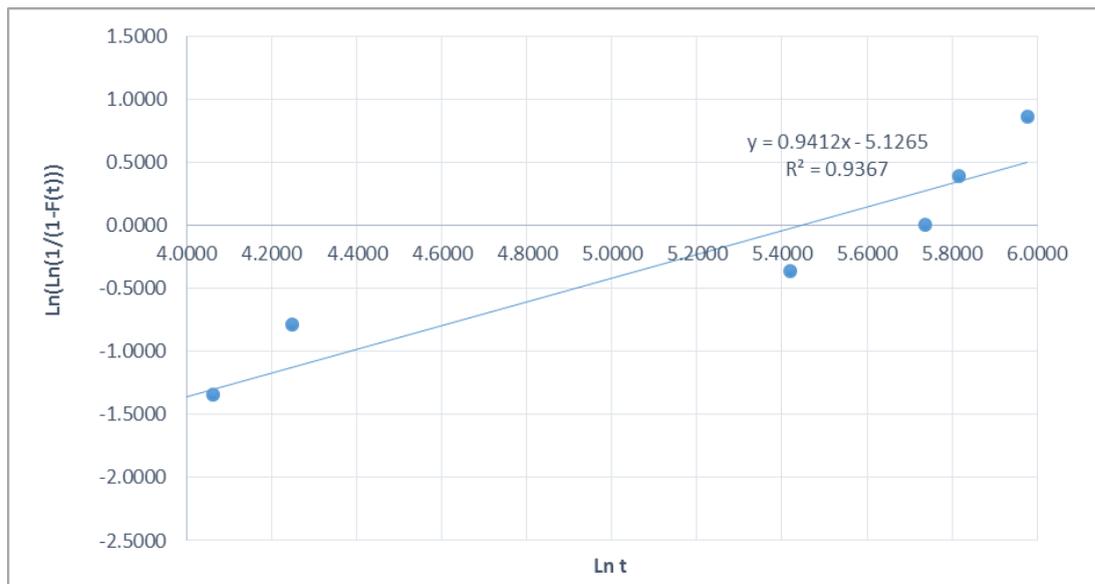
Tabla 3

Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos de operación de la retroexcavadora (420E)

i	Tiempo operación ordenado (h)	Rango de media RM F(t)	x = ln(t)	y = ln(ln(1/(1-F(t))))
1	22	0.0946	3.0910	-2.3089
2	58	0.2297	4.0604	-1.3432
3	70	0.3649	4.2485	-0.7898
4	226	0.5000	5.4205	-0.3665
5	310	0.6351	5.7366	0.0082
6	336	0.7703	5.8171	0.3858
7	394	0.9054	5.9764	0.8579

Figura 5

Ecuación lineal de regresión para tiempos de operación de la retroexcavadora (420E)



Nota. Muestra el parámetro de forma beta (β) = 0.9412, y el punto de intersección o constante = 5.1265. R^2 representa el grado de linealidad de los datos = 0.9367.

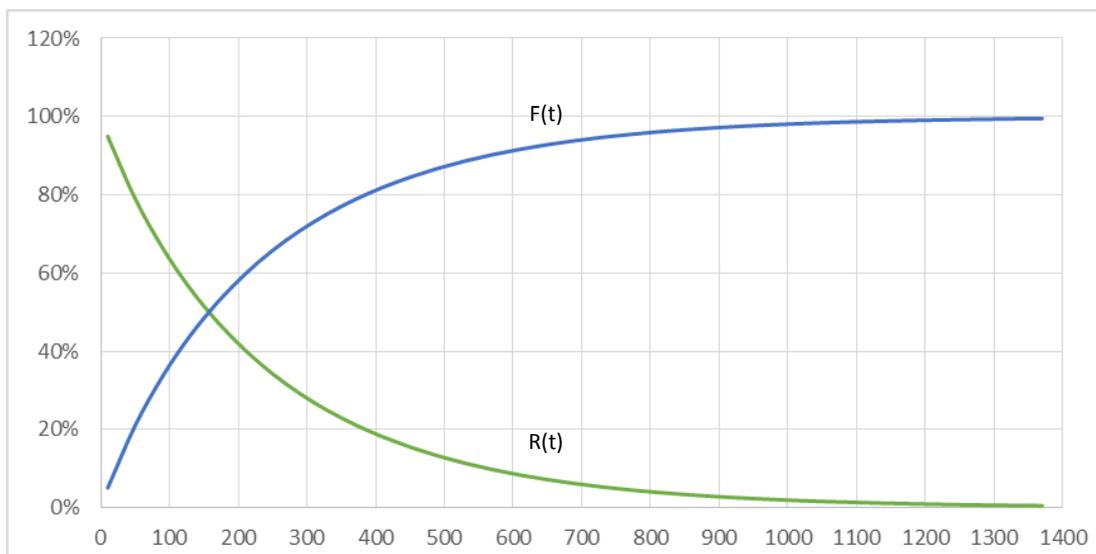
El parámetro de escala α de la distribución Weibull, se determinó con Ecuación (10).

$$\alpha = e^{5.1265/0.9412} = 232.075$$

Los valores encontrados del parámetro de forma β de 0.9412 para la retroexcavadora (420E); permitieron identificar el periodo de vida operativa en la que se encontraba la maquina mediante la utilización de la curva de Davies, lo que indicó que la máquina se localizaba en un periodo de mortalidad infantil, cerca a uno donde se presentan las fallas aleatorias.

Figura 6

Comportamiento de la confiabilidad y desconfiabilidad para diferentes periodos operativos de la retroexcavadora (420E)



Nota. $R(t)$: Confiabilidad, $F(t)$: Desconfiabilidad.

Según los datos presentados en la Figura 6, se pudo observar que la confiabilidad de la retroexcavadora (420E) dentro de un periodo operativo de 176 horas (1 mes) alcanzó un valor del 46 %.

4.3.2 Resultados de cálculo de confiabilidad mediante modelo de Weibull de la excavadora (210G Lx).

Los datos proporcionados en la Tabla 4, representan la aplicación del Método de los Mínimos Cuadrados, en donde se calcularon los valores de la abscisa (x) y ordenada (y), de cada tiempo operativo de la excavadora (210G Lx), los mismos que se utilizaron para la representación gráfica del método, Figura 7.

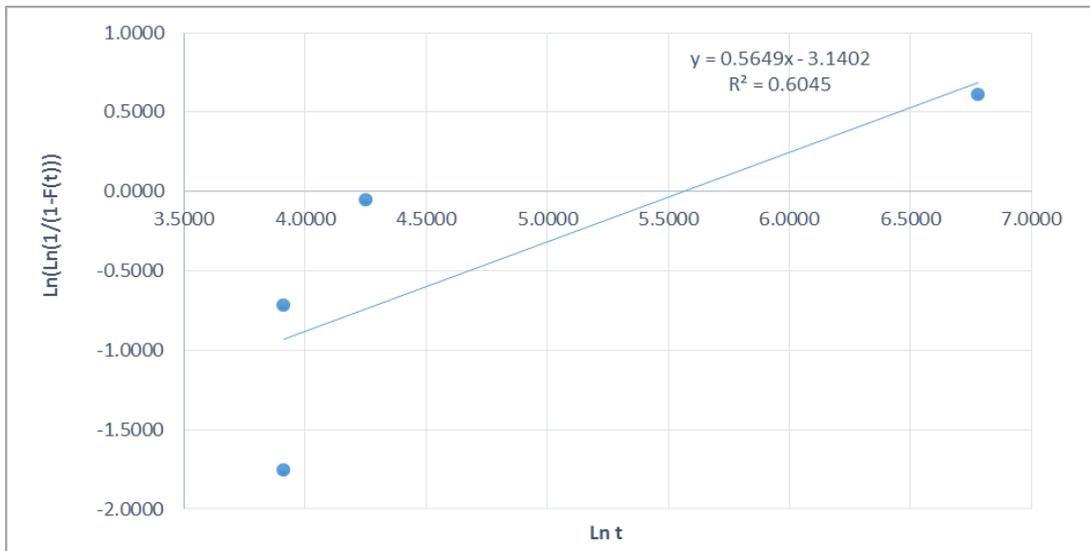
Tabla 4

Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para los tiempos de operación de la excavadora (210G Lx)

i	Tiempo operación ordenado (h)	Rango de media RM F(t)	x = ln(t)	y = ln(ln(1/(1-F(t))))
1	50	0.1591	3.9120	-1.7529
2	50	0.3864	3.9120	-0.7167
3	70	0.6136	4.2485	-0.0503
4	880	0.8409	6.7799	0.6088

Figura 7

Ecuación lineal de regresión para tiempos de operación de la excavadora (210GLx)



Nota. Muestra el parámetro de forma beta (β) = 0.5649, y el punto de intersección o constante = 3.1402. R^2 representa el grado de linealidad de los datos = 0.6045.

El parámetro de escala α de la distribución Weibull, se determinó con Ecuación (10).

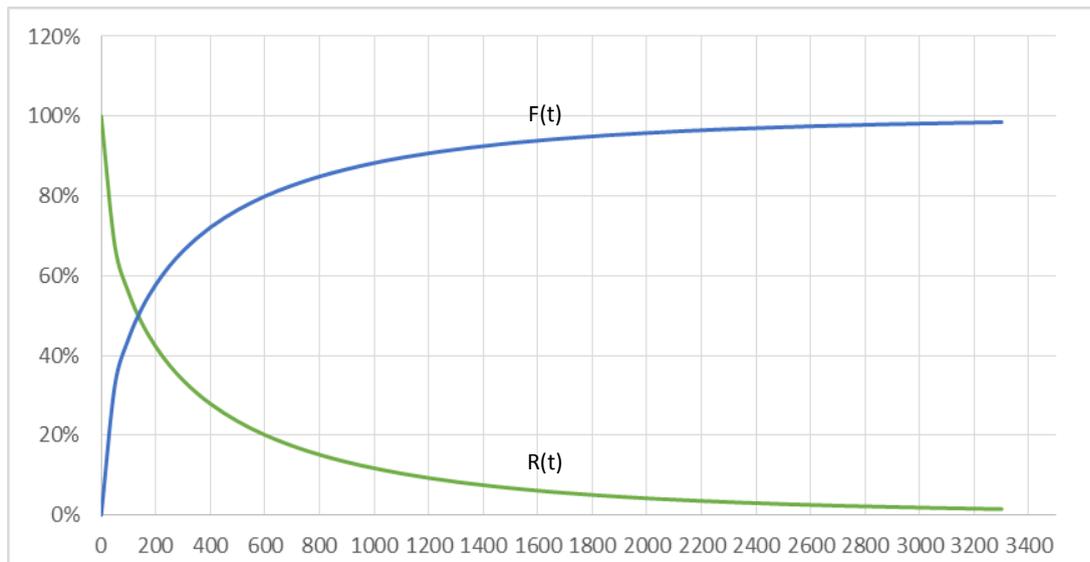
$$\alpha = e^{3.1402/0.5649} = 259.53$$

El R^2 , no tiene buena representación con el grado de linealidad de los datos, es poco bajo, debido a que existe un dato atípico de 880 horas. Los valores encontrados del parámetro de forma β de 0.9412 para la excavadora (210GLx); permitieron identificar el periodo de vida

operativa en la que se encontraba la maquina mediante la utilización de la curva de Davies, lo que indicó que la máquina se localizaba en un periodo de mortalidad infantil.

Figura 8

Comportamiento de la confiabilidad y desconfiabilidad para diferentes periodos operativos de la excavadora (210GLx)



Nota. R (t): Confiabilidad, F (t): Desconfiabilidad.

Así mismo, en la Tabla 5 se muestra un resumen de resultados del cálculo de la confiabilidad para las maquinas más críticas.

Tabla 5

Resumen de resultados del cálculo de la confiabilidad para un periodo operativos de las maquinas más críticas

Equipos	i (Número de fallas)	Horas totales de operación (h)	Confiabilidad (%) (t= 176 horas)
Retroexcavadora (420E)	7	1416	46%
Excavadora (210G Lx)	4	1050	45%

Según los datos presentados en la Figura 6 y 8, y resultados mostrados en la Tabla 5; se observa que la confiabilidad de la retroexcavadora (420E) dentro de un periodo operativo de 176 horas (1 mes) alcanzó un valor del 46 %. Mientras que la excavadora (210G Lx), para el mismo periodo de evaluación (1mes) llega a un 45 %, debido a que presenta un menor número de horas de operación para el periodo de evaluación que la retroexcavadora (420E).

4.4 Determinación de la disponibilidad operacional mediante modelo de Weibull de las maquinas más críticas

Para determinar la disponibilidad operación, se utilizó los tiempos de reparación, tiempos entre fallas de las maquinas más críticas. Para la determinación de los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calcularon mediante el método de Mínimos Cuadrados.

4.4.1 Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos de reparación de la retroexcavadora (420E).

Los datos proporcionados en la Tabla 6, representan la aplicación del Método de los Mínimos Cuadrados, en donde se calcularon los valores de la abscisa (x) y ordenada (y), de cada tiempo de reparación la retroexcavadora (420E), los mismos que se utilizaron para la representación gráfica del método, Figura 9.

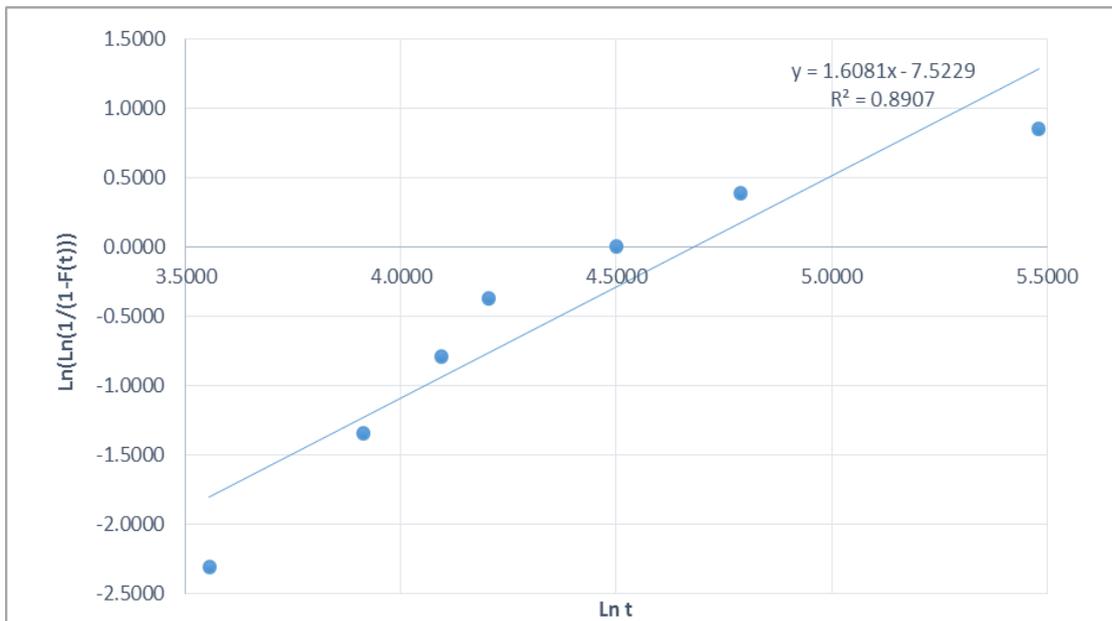
Tabla 6

Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos de reparación de la retroexcavadora (420E)

i	Tiempo reparación ordenado (h)	Rango de media RM = F(t)	x = ln(t)	y = ln(ln(1/(1-F(t))))
1	35	0.0946	3.5553	-2.3089
2	50	0.2297	3.9120	-1.3432
3	60	0.3649	4.0943	-0.7898
4	67	0.5000	4.2047	-0.3665
5	90	0.6351	4.4998	0.0082
6	120	0.7703	4.7875	0.3858
7	240	0.9054	5.4806	0.8579

Figura 9

Ecuación lineal de regresión para tiempos de reparación de la retroexcavadora (420E)



Nota. Muestra el parámetro de forma beta (β) = 1.6081, y el punto de intersección o constante = 7.5229. R^2 representa el grado de linealidad de los datos = 0.8907.

El parámetro de escala α de la distribución Weibull, se determinó con Ecuación (10).

$$\alpha = e^{7.5229/1.6081} = 107.55$$

4.4.2 Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos entre fallas de la retroexcavadora (420E).

Los datos proporcionados en la Tabla 7, representan la aplicación del Método de los Mínimos Cuadrados, donde se calcularon los valores de la abscisa (x) y ordenada (y), de cada tiempo entre fallos de la retroexcavadora (420E), los mismos que se utilizaron para la representación gráfica del método, Figura 10.

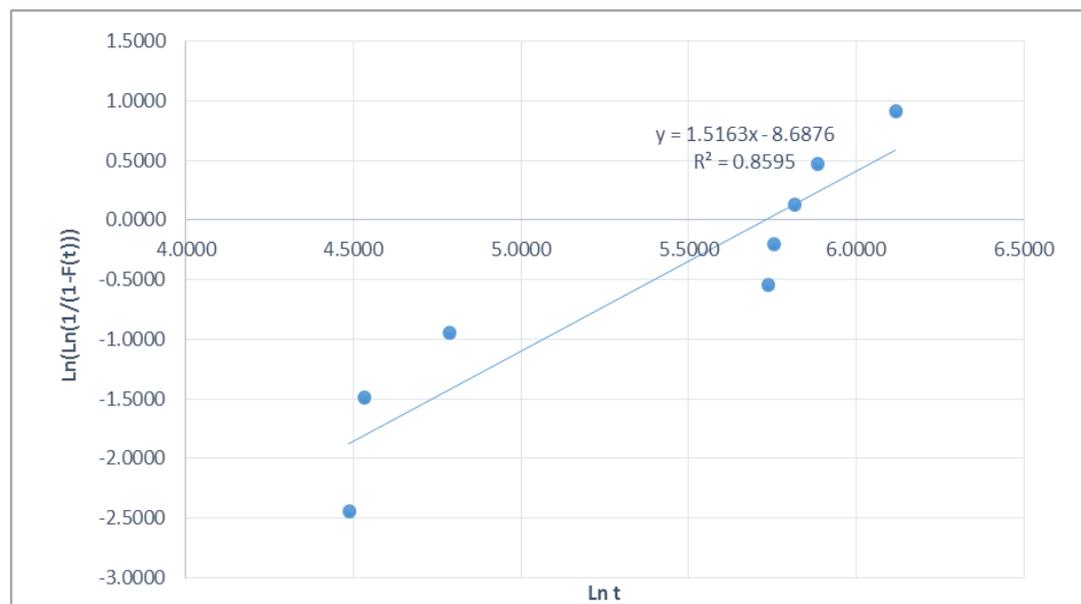
Tabla 7

Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos entre fallos de la retroexcavadora (420E)

i	Tiempo entre fallas ordenado (h)	Rango de media RM = F(t)	x = ln(t)	y = ln(ln(1/(1-F(t))))
1	89	0.0833	4.4886	-2.4417
2	93	0.2024	4.5326	-1.4867
3	120	0.3214	4.7875	-0.9474
4	310	0.4405	5.7366	-0.5436
5	316	0.5595	5.7557	-0.1986
6	336	0.6786	5.8171	0.1266
7	360	0.7976	5.8861	0.4685
8	454	0.9167	6.1181	0.9102

Figura 10

Ecuación lineal de regresión para tiempos entre fallos de la retroexcavadora (420E)



Nota. Muestra el parámetro de forma beta (β) = 1.5163, y el punto de intersección o constante = 8.6876. R^2 representa el grado de linealidad de los datos = 0.8595.

El parámetro de escala α de la distribución Weibull, se determinó con Ecuación (10).

$$\alpha = e^{8.6876/1.5163} = 307.76$$

4.4.3 Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos de reparación de la excavadora (210G Lx).

Los datos proporcionados en la Tabla 8, representan la aplicación del Método de los Mínimos Cuadrados, en donde se calcularon los valores de la abscisa (x) y ordenada (y), de cada tiempo de reparación para la excavadora (210G Lx), los mismos que se utilizaron para la representación gráfica del método, Figura 11.

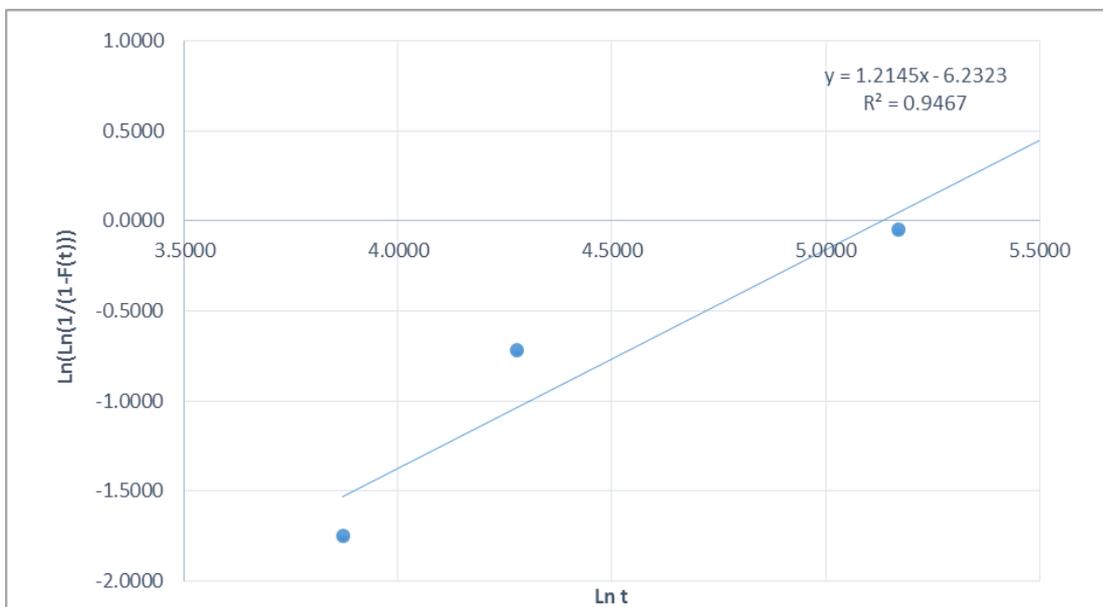
Tabla 8

Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos de reparación de la excavadora (210G Lx)

i	Tiempo reparación ordenado (h)	Rango de media RM = F(t)	x = ln(t)	y = ln(ln(1/(1-F(t))))
1	48	0.1591	3.8712	-1.7529
2	72	0.3864	4.2767	-0.7167
3	176	0.6136	5.1705	-0.0503
4	280	0.8409	5.6348	0.6088

Figura 11

Ecuación lineal de regresión para tiempos de reparación de la excavadora (210G Lx)



Nota. Muestra el parámetro de forma beta (β) = 1.2145, y el punto de intersección o constante = 6.2323. R^2 representa el grado de linealidad de los datos = 0.9467.

El parámetro de escala α de la distribución Weibull, se determinó con Ecuación (10).

$$\alpha = e^{6.2323/1.2145} = 169.30$$

4.4.4 Resultados de cálculo de parámetros del modelo de Weibull para tiempos entre fallas de la excavadora (210G Lx).

Los datos proporcionados en la Tabla 9, representan la aplicación del Método de los Mínimos Cuadrados, en donde se calcularon los valores de la abscisa (x) y ordenada (y), de cada tiempo entre fallas para la excavadora (210G Lx), los mismos que se utilizaron para la representación gráfica del método, Figura 12.

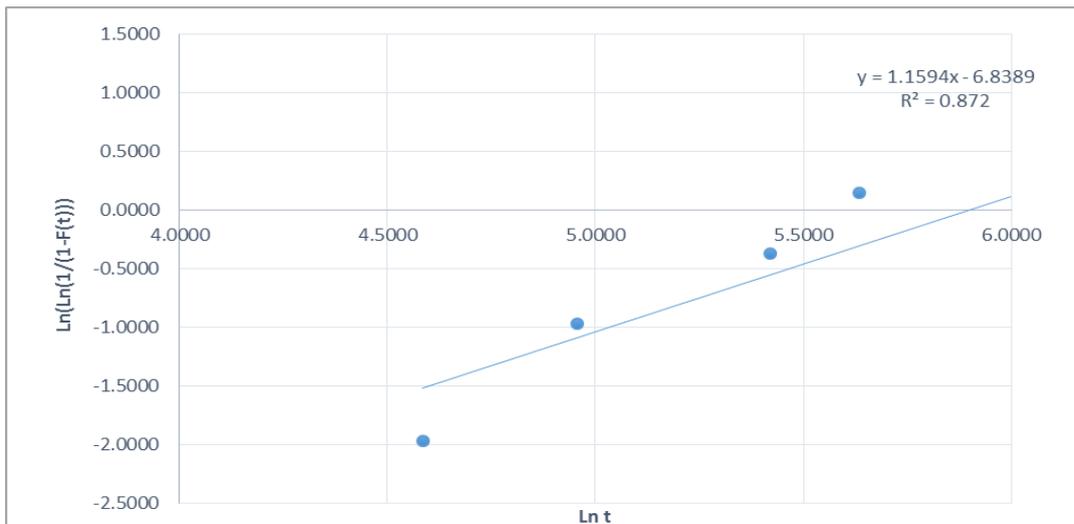
Tabla 9

Alineación de parámetros por el método de Mínimos Cuadrados para tiempos entre fallas de la excavadora (210G Lx)

i	Tiempo entre fallas ordenado (h)	Rango de media RM = F(t)	x = ln(t)	y = ln(ln(1/(1-F(t))))
1	98	0.1296	4.5850	-1.9745
2	142	0.3148	4.9558	-0.9727
3	226	0.5000	5.4205	-0.3665
4	280	0.6852	5.6348	0.1448
5	880	0.8704	6.7799	0.7145

Figura 12

Ecuación lineal de regresión para tiempos entre fallas de la excavadora (210G Lx).



Nota. Muestra el parámetro de forma beta (β) = 1.1594, y el punto de intersección o constante = 6.8389. R^2 representa el grado de linealidad de los datos = 0.872.

El parámetro de escala α de la distribución Weibull, se determinó con Ecuación (10).

$$\alpha = e^{6.8389/1.1594} = 364.53$$

4.4.5 Resultados de cálculo del MTBF, MTTR, y disponibilidad operacional mediante modelo de Weibull de las máquinas más críticas.

Según Rodríguez (2018), los cálculos de la disponibilidad de manera general se pueden realizar a partir de los valores del tiempo medio entre fallos (MTBF) y tiempo medio para reparar (MTTR).

Cuando se considera un entorno de soporte realista y todas las acciones de mantenimiento, incluso aquellas no requeridos como resultado de fallas relacionadas con el diseño o la fabricación, se tiene la disponibilidad operativa (D_0). D_0 es una función de confiabilidad, mantenibilidad y soporte. Se debe hacer todo lo posible para considerar explícitamente cada elemento de D_0 en el desarrollo temprano y durante todo el ciclo de vida del sistema (OPAH, s. f.).

Una vez obtenidos los valores de los parámetros de forma y escala de los tiempos entre fallos, y de reparación, se calcularon los tiempos promedio entre fallos y reparación con el uso de las Ecuaciones (11) y (12) respectivamente, que permitieron el cálculo de la disponibilidad operacional adecuada para la evaluación, mediante la utilización de la Ecuación (13) de la disponibilidad operacional. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

$$MTBF = \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (11)$$

$$MTTR = \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (12)$$

$$D_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (13)$$

Donde, Γ Función gamma, MTBF Tiempo medio entre fallos, MTTR Tiempo medio de reparación, D_0 Disponibilidad operacional.

Tabla 10*Resultados del cálculo de la disponibilidad operacional de las maquinas más críticas*

Equipos	i (Número de fallas)	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilidad operacional (%)
Retroexcavadora (420E)	7	277.47	96.38	74.22%
Excavadora (210G Lx)	4	346.11	158.77	68.55%

Nota. MTBF: Tiempo Medio entre Fallas, MTTR: Tiempo Medio de Reparación

La retroexcavadora (420E) contaba con una disponibilidad del 74.22 % y la excavadora (210G Lx) del 68.55 %; lo que significaba que la retroexcavadora (420E) tenía una mayor disponibilidad, esto debido a que presenta un menor MTTR, a pesar de presentar un mayor número de fallos. Mientras que la excavadora (210G Lx) por el contrario presentó un mayor MTTR y su disponibilidad operativa fue menor.

IV. Discusión

Para la evaluación de confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio –Cajamarca, se aplicó la metodología de distribución de Weibull conjuntamente con el método de mínimos cuadrados. Resultó que las máquinas más críticas tienen una confiabilidad y disponibilidad operacional baja en comparación con valores recomendados por otros autores. Metodología concuerda con Conde y Mosquera (2022), a diferencia que desarrollaron una herramienta informática, enfocada a facilitar al usuario la información y resultados necesarios para un análisis de confiabilidad mediante una distribución de Weibull, aplicado a una flota vehicular. La confiabilidad y disponibilidad operacional están correlacionados.

Para los cálculos se utilizaron los datos operativos y de reparación de la maquinaria pesada de la municipalidad. Se determinó los fallos de la maquinaria pesada utilizada para rehabilitación y obras de infraestructura, para el periodo operativo 10 de febrero del 2021 a 27 junio del 2022, donde las fallas son diversas en cada máquina. Odeyar et al. (2022) también utilizó las horas de operación y reparación para el análisis de fallas y confiabilidad para equipos pesados y sus componentes utilizados en minería. De igual manera Sanchez (2021), para implementar un sistema de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), tuvo como población de estudio excavadoras, y la muestra del estudio, se estableció como la excavadora del modelo 345D L de manera estratégica. Los periodos de evaluación de la maquinaria van a depender de datos que cuente la empresa, la calidad de datos también es influyente.

Para el análisis de la prioridad de fallos de la maquinaria pesada, se utilizó el diagrama de Pareto, concluyendo, que existe el 20% de máquinas, que provocan el 80 % de tiempo total de reparaciones producto de eventos de falla. Se concluye que la retroexcavadora (420E), y excavadora (210G Lx) son las máquinas más críticas. Metodología que también concuerda con Conde y Mosquera (2022), que por el tamaño del historial de fallos de cada máquina, optó por el análisis mediante un diagrama de Pareto a cada agrupación por tipo de máquina de la empresa, con resultados de mejor entendimiento y fácil estudio, del cual se obtuvo, que los tractores, cargadoras, motoniveladoras y retroexcavadoras, representan mayor criticidad y coste a la empresa.

La determinación de la confiabilidad se realizó mediante distribución de Weibull de las máquinas más críticas, se utilizó los tiempos de operación hasta la falla, y la determinación de los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados. Para la retroexcavadora (420E), el parámetro de forma beta (β) resultó 0.9412, y el parámetro de escala (α) igual 232.075. Así mismo para la excavadora (210G Lx) se tiene un parámetro de forma beta (β) de 0.5649, y el parámetro de escala (α) igual 259.53. Se concluye que la confiabilidad de la retroexcavadora (420E) dentro de un periodo operativo de 176 horas alcanzó un valor del 46 %. Mientras que la excavadora (210G Lx), para el mismo periodo de evaluación llega a un 45 %, debido a que presenta un menor número de horas de operación para el periodo de evaluación que la retroexcavadora (420E). Metodología de cálculo guarda relación con Conde y Mosquera (2022) que realiza un análisis de confiabilidad mediante una distribución de Weibull, aplicado a una flota vehicular; determina la confiabilidad por cada máquina crítica, con una herramienta informática en el entorno conocido como Visual Basic, dentro del programa estadístico de Excel, la herramienta puede proporcionar datos de confiabilidad, desconfiabilidad, con una gráfica la tasa de fallos, esenciales para realizar un análisis de confiabilidad. Así mismo Arebalo y Calle (2019), proponen un mantenimiento basado en RCM, para la gestión de mantenimiento en la maquinaria pesada perteneciente a la Municipalidad Distrital de San José de Lourdes, determinan la confiabilidad de los equipos más críticos, utilizando el método Weibull. La confiabilidad de las máquinas críticas 420E, y 210G Lx, es baja en comparación con otros autores, por lo que se deben establecer criterios que aporten mejoras en el mantenimiento.

Para la determinación de la disponibilidad operacional mediante distribución de Weibull de las máquinas más críticas, los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados. Se determinó el tiempo medio entre fallos (MTBF), y el tiempo medio para reparar (MTTR) en cada máquina crítica. La retroexcavadora (420E) contaba con una disponibilidad del 74.22 % y la excavadora (210G Lx) del 68.55 %; lo que significaba que la retroexcavadora (420E) tenía una mayor disponibilidad, esto debido a que presenta un menor MTTR, a pesar de presentar un mayor número de fallos. Mientras que la excavadora (210G Lx) por el contrario presentó un mayor MTTR y una disponibilidad operativa menor. Ojo et al. (2022) en un estudio de caso del motor diesel Caterpillar C32, los indicadores clave de rendimiento críticos, como MTTF, MTTR, MTBF, etc., son esenciales para analizar el rendimiento del sistema de refrigeración

del motor; determinó que la disponibilidad operativa del motor viene dada por 72%. La disponibilidad operativa va depender del tipo de máquinas a evaluar.

Conclusiones

Se evaluó la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio – Cajamarca; y una vez aplicada la metodología de distribución de Weibull conjuntamente con el método de mínimos cuadrados. Resultó que las maquinas más críticas tienen una confiabilidad y disponibilidad operacional baja, y están correlacionadas. Se puede concluir que el estudio y conocimiento de indicadores es muy útil para el control y evaluación de las gestiones de mantenimiento dentro del pool de maquinaria de la municipalidad, debido a que su utilización permitirá establecer criterios que aporten mejoras a la gestión que a su vez asegurará la operatividad y eficiencia de la maquinaria pesada.

Se determinó los fallos de la maquinaria pesada, para el periodo operativo 10 de febrero del 2021 a 27 junio del 2022, para lo cual se utilizaron los datos operativos y de reparación del pool de maquinaria pesada, tomando del área de maestranza; la municipalidad cuenta con (01) tractor oruga, (01) retroexcavadora, (01) excavadora, (01) motoniveldora, (01) cargador frontal, y (01) rodillo compactador; utilizada para rehabilitación y obras de infraestructura.

Se analizó la prioridad de fallos de la maquinaria pesada, para lo cual se utilizó el diagrama de Pareto, concluyendo, que existe el 20% de máquinas, que provocan el 80 % de tiempo total de reparaciones producto de eventos de falla. Del análisis de prioridad de fallos, se concluye que la retroexcavadora (420E), y excavadora (210G Lx) son las máquinas más críticas.

Se determinó la confiabilidad mediante distribución de Weibull de las máquinas más críticas, se utilizó los tiempos de operación hasta la falla, y la determinación de los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados. Para la retroexcavadora (420E), el parámetro de forma beta (β) resultó 0.9412, y el parámetro de escala (α) igual 232.075. Así mismo para la excavadora (210G Lx) se tiene un parámetro de forma beta (β) de 0.5649, y el parámetro de escala (α) igual 259.53. Se concluye que la confiabilidad de la retroexcavadora (420E) dentro de un periodo operativo de 176 horas (1 mes) alcanzó un valor del 46 %. Mientras que la excavadora (210G Lx), para el mismo periodo de evaluación llega a un 45 %, debido a que presenta un menor número de horas de operación para el periodo de evaluación que la retroexcavadora (420E). La

confiabilidad de las maquinas es baja en comparación con otras fuentes, establecer criterios que aporten mejoras en el mantenimiento.

Se determinó la disponibilidad operacional mediante distribución de Weibull de las maquinas más críticas, la determinación de los parámetros de la distribución de Weibull α y β , se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados. Primeramente se determinaron el tiempo medio entre fallos (MTBF), y el tiempo medio para reparar (MTTR) en cada máquina crítica. La retroexcavadora (420E) contaba con una disponibilidad del 74.22 % y la excavadora (210G Lx) del 68.55 %; lo que significaba que la retroexcavadora (420E) tenía una mayor disponibilidad, esto debido a que presenta un menor MTTR, a pesar de presentar un mayor número de fallos. Mientras que la excavadora (210G Lx) por el contrario presentó un mayor MTTR y una disponibilidad operativa menor. La disponibilidad operacional de las maquinas es un poco baja en comparación con otras fuentes, se deben reducir las horas de reparación de las máquinas. La disponibilidad operativa de un sistema es la probabilidad de que la máquina, cuando se utilice en condiciones específicas, funcione satisfactoriamente en cualquier momento; el tiempo observado comprende el tiempo de actividad y el tiempo de inactividad.

Recomendaciones

Actualizar los cálculos de confiabilidad de las maquinas más críticas; conforme se va actualizando la data histórica de fallos.

Hacer mejoras al mantenimiento, y así también mejorar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad operacional. Rediseñar la gestión del mantenimiento actual, priorizando las actividades preventivas según las fallas de los elementos críticos, así mismo se debe implementar un mantenimiento basado en la confiabilidad.

Plantear estrategias en el mantenimiento, para reducir el tiempo medio de reparación (MTTR) de las maquinas, y mejorar la disponibilidad operacional.

Referencias bibliográficas

- Ahmadi, S., Moosazadeh, S., Hajihassani, M., Moomivand, H., y Rajaei, M. M. (2019). Reliability, availability and maintainability analysis of the conveyor system in mechanized tunneling. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 145, 756-764. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.009>
- Arebalo, A., y Calle, J. (2019). *Plan de Mantenimiento centrado en la confiabilidad de la maquinaria pesada de la municipalidad distrital de San José de Lourdes, San Ignacio, Cajamarca*. Universidad Nacional de Jaén.
- Conde, L., y Mosquera, C. (2022). *Desarrollo de una herramienta informática para el estudio de la confiabilidad en flotas de transporte basado en el método de Weibull* [Universidad Politecnica Salesiana - Sede Cuenca]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23126/1/UPS-CT010014.pdf>
- Dašić, P., Živković, M., y Karić, M. (2015). Reliability Analysis of the Hydro-System of Excavator SchRs 800 Using Weibull Distribution. *Applied Mechanics and Materials*, 806(November), 173-180. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.806.173>
- Furuly, S. (2012). *Application of reliability and maintainability analysis in the Svea coal mine*. May. <https://pdfs.semanticscholar.org/d2c3/1d1e65d7a8c2958d07a72a1727a904f7ed86.pdf>
- Gaurav, K., Agrawal, A. K., Chattopadhyaya, S., y Siddiqui, M. A. H. (2019). Reliability and maintainability analysis of universal drill machine at Saoner mines, Nagpur, India. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 691(1), 1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/691/1/012014>
- Magalhães, I. (2015). *MTBF, MTBR, MTTR, MTTF, MTBDE and FIT*. <https://www.linkedin.com/pulse/mtbf-mtbr-mttr-mttf-mtbde-fit-ivan-luizio-magalhães>
- Mesa, D., Ortiz, Y., y Pinzon, M. (2006). La Confiabilidad, la Disponibilidad Y la Mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica Año XII*, 30, 155-160.
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., y Romero, H. (2018). Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. En Ediciones de la U (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Quinta edi). www.edicionesdelau.com
- Odeyar, P., Apel, D. B., Hall, R., Zon, B., y Skrzypkowski, K. (2022). A Review of Reliability and Fault Analysis Methods for Heavy Equipment and Their Components

- Used in Mining. *Energies*, 15(17), 1-27. <https://doi.org/10.3390/en15176263>
- Ojo, E. R., Ujile, A. A., y Nkoi, B. (2022). Improving the Reliability of the Cooling Water System of a Marine Diesel Engine : A Case Study of Caterpillar C32 Diesel Engine. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 10(May). <https://doi.org/https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41166>
- OPAH. (s. f.). *Section 1: Introduction to Operational Availability (Ao)* (pp. 1-10). <https://www.acqnotes.com/Attachments/Introduction to Operational Availability.pdf>
- Pascale, E., Freneaux, T., Sista, R., Sannino, P., Marmo, P., y Bouillaut, L. (2017). Application of the Weibull distribution for the optimization of maintenance policies of an electronic railway signaling system. *HAL Open science*, 3409-3416. <https://doi.org/10.1201/9781315210469-429>
- Pulgarín, S. (2019). *Aproximación de la confiabilidad para optimizar procesos de mantenimiento y productivos con Distribución Weibull* [Universidad EAFIT]. <http://hdl.handle.net/10784/15890>
- Ramirez, M. (2001). *Operación y mantenimiento de maquinaria pesada* (Número 5). http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14742/dec_d_5016.pdf?sequence=1
- Rodriguez, F. (2018). *Análisis De Confiabilidad, Mantenibilidad Y Disponibilidad Mediante La Aplicación De La Distribución De Weibull. Estudio De Caso Separadoras De Aceite Westfalla De La Empresa Agip Oil Ecuador*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Sanchez, J. (2021). *Propuesta e implementación de un plan de mantenimiento basado en el enfoque RCM para mejorar la disponibilidad mecánica del motor de combustión interna, sistema eléctrico y sistema hidráulico de la excavadora CAT 345D L de la empresa SERVI SA* [Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/5064>
- Warden, C.-. (2013). *Reliability, Availability and Maintainability Analysis of the Main Conveyor System in Underground Coal Mine: A Case Study of Churcha (RO) Mine*. 2013, 3-4.
- Zamora, J. R., Briones, R., y Arteaga, Á. R. (2022). *Determinación de la disponibilidad de un sistema de refrigeración industrial para la industria atunera Determining the availability of an industrial refrigeration system for the tunny industry*. 25(2), 1-8. <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v25n2/1815-5944-im-25-02-1.pdf>

- Zhang, L., Jin, G., y You, Y. (2019). Reliability assessment for very few failure data and weibull distribution. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8947905>
- Zhu, L., Chen, D., y Feng, P. (2021). Equipment Operational Reliability Evaluation Method Based on RVM and PCA-Fused Features. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6687248>

Anexos

Anexo 01

Instrumentos de recolección de datos

Instrumento: Guía de observación de datos técnicos y operatividad de maquinaria

Empresa y/o Entidad:

Periodo de evaluación:

Fecha:

N°	Equipo/maquinaria		Estado actual Operativa/Inoperativa	Causas de inoperatividad
	Descripción	Modelo/ serie		



Instrumento: Ficha de registro de fallas de maquinaria pesada

Empresa y/o Entidad:

Periodo de evaluación:

Fecha:

N°	Equipo/maquinaria		Componente	Descripción de la falla	N° Fallas	Horómetro (horas)	Fecha	Tiempo de operación hasta la falla (horas)	Tiempo de reparación (horas)
	Descripción	Modelo/serie							



Anexo 02

Validez y confiabilidad de instrumentos

Constancia de evaluación

Yo, Eduar Jamis Mejía Vásquez, con DNI 40695828, de profesión Ingeniero Mecánico Electricista, con Registro CIP 86534; desempeñándome como Coordinador de Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica, hago constar:

Por medio de la presente he revisado con fines de validación los instrumentos: Guía de observación de datos técnicos y operatividad de maquinaria, y ficha de registro de fallas de maquinaria pesada; de la tesis del Bachiller Segundo Romelio Coronel Gavidia, titulada **“Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca”**.

Luego de hacer las observaciones pertinentes, se puede formular las siguientes apreciaciones:

Ítem	Criterio	Muy adecuado	Adecuado	Poco adecuado	Inadecuado
1	Congruencia de ítems	X			
2	Aptitud de contenido	X			
3	Redacción de ítems	X			
4	Metodología	X			
5	Pertinencia		X		
6	Coherencia	X			
7	Organización	X			
8	Objetividad	X			
9	Claridad	X			

Conclusión: El instrumento es: Muy adecuado.

Muy adecuado (X) Adecuado () Poco adecuado () Inadecuado ()

En señal de conformidad firmo la presente, en la ciudad de Bagua Grande a los 14 días del mes de abril del 2023.

Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez
Coordinador Escuela Profesional
Ingeniería Mecánica -UPA

Anexo 03
Matriz de consistencia

1. TITULO	4. VARIABLE DE ESTUDIO	8. INSTRUMENTOS
<p>Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca.</p>	<p>a) Variable independiente (VI) Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull</p> <p>b) Variable dependiente (VD) Disponibilidad operacional</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Instrumento: Guía de observación de datos técnicos y operatividad de maquinaria pesada. - Instrumento: Ficha de registro de fallas de maquinaria pesada.
2. FORMULACION DEL PROBLEMA	5. HIPOTESIS GENERAL	
<p>¿Se podrá evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio – Cajamarca?.</p>	<p>Se puede evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio – Cajamarca.</p>	

3. OBJETIVOS	6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO
<p>3.1. Objetivo General</p>	<p>El tipo de investigación es básica, y un diseño de investigación descriptiva correlacional causal, no experimental.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p>M: $V_1 \xrightarrow{r} V_2$</p> <p>M: Muestra V_1: Variable independiente V_2: Variable dependiente</p> </div>	<p>El análisis estadístico está basada en el modelo de la distribución de Weibull. Para la alineación de parámetros del modelo se realizó por el método de mínimos cuadrados, además la ecuación lineal que representa al conjunto de los datos, y el r^2 que mide el grado de linealidad de los datos. El análisis estadístico se realizó con ayuda del software Excel.</p>
<p>Evaluar la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio –Cajamarca.</p>		
<p>3.2. Objetivos Específicos</p>		
<ul style="list-style-type: none"> - Determinar los fallos de la maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe. - Analizar la prioridad de fallos de la maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe. - Determinar la confiabilidad mediante distribución de Weibull de las máquinas más críticas de la Municipalidad Distrital de Namballe. - Determinar la disponibilidad operacional mediante distribución de Weibull de las maquinas más críticas de la Municipalidad Distrital de Namballe. 	<p>7. POBLACION Y MUESTRA</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> - Población: Maquinaria de la Municipalidad Distrital de Namballe. - Muestra: Maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe 2021-2022. 	

Anexo 04

Cartas de autorización para realizar la investigación

“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

Bagua Grande, 28 de abril del 2022

Señor:

Ronal Edilfonso Olivera Aldas
Alcalde de la Municipalidad Distrital de Namballe
Namballe, San Ignacio

Asunto: Solicita autorización para la ejecución del Proyecto de Tesis de Ingeniería Mecánica.

De mi especial consideración:

Es grato saludarle y desearle las más grandes bendiciones de Dios en el desempeño de sus funciones en la Municipalidad Distrital de Namballe.

Motivo de la presente, es para solicitar su autorización para que mi persona el **Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidia**, con **DNI N° 48033317**, egresado de la Universidad Politécnica Amazónica, pueda realizar la recopilación de información necesaria para ejecutar mi proyecto de Tesis, titulada “**Evaluación de la Confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio - Cajamarca**”, en la institución que pertenece a su digna dirección, agradezco me brinde las facilidades correspondientes.

Sin otro particular, me despido de usted, no sin antes expresarle los sentimientos de mi especial consideración.

Atentamente,

Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidia
DNI N° 48033317

MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE NAMBALLE	
MESA DE PARTES	
FOLIO: 01	28 ABR 2022
REG. N° 998	HORA: 2:20 PM
DESTINO: Alcaldía	
RECEPCION:	



MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE NAMBALLE SAN IGNACIO - CAJAMARCA

RUC: 20326259081



“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

Namballe, 29 de abril del 2022

Señor:

Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidia

Tesista

Universidad Politécnica Amazónica

Asunto : Respuesta a solicitud de autorización para la ejecución de Proyecto de Tesis de Ingeniería Mecánica.

Referencia : Solicitud S/N, de fecha 28 de abril del 2022

Visto la solicitud presentada:

Se concede precedente el permiso para la recopilación de información necesaria al **Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidia**, con DNI N° 48033317, egresado de la Universidad Politécnica Amazónica, para la ejecución del Proyecto de Tesis, titulada “**Evaluación de la Confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio – Cajamarca**”. Por lo que se recomienda realizar las coordinaciones respectivas con los responsables de área para la recopilación de información que crea conveniente para la ejecución de su investigación.

Atentamente,

Anexo 05
Fotografías



Nota. Excavadora 210G Lx



Nota. Tractor oruga D6M



Nota. Cargador frontal 924K

Anexo 06

Reporte de similitud

Resultado del análisis

Archivo: INFORME FINAL SEGUNDO ROMELIO CORONEL GAVIDIA.docx

Estadísticas

Sospechosas en Internet: 7,27%

Porcentaje del texto con expresiones en internet Δ .



Sospechas confirmadas: 5,25%

Confirmada existencia de los tramos en las direcciones encontradas Δ .

Texto analizado: 83,07%

Porcentaje del texto analizado efectivamente (no se analizan las frases cortas, caracteres especiales, texto roto).

Éxito del análisis: 99,94%

Porcentaje de éxito de la investigación, indica la calidad del análisis, cuanto más alto mejor.

Direcciones más relevantes encontrados:

Dirección (URL)	Ocurrencias	Semejanza
https://www.academia.edu:443/19918119/Reliability_Analysis...	22	2,9 %
https://www.hella.com/techworld/es/Informacion-Tecnica/Electricidad-y-electronica-del-automovil/Recirculacion-de-gases-de-escape-3491/	15	6,23 %
https://ingenieria.lasalle.mx/licenciaturas/ingenieria-mecanica	14	3,64 %
https://www.linguee.com/spanish-english/translation/y%20no%20morir%20en%20el%20intento.html	12	2,07 %
https://www.academia.edu:443/13928853/LA_CONFIABILIDAD_LA...	11	9,76 %
https://reliabilityweb.com/sp/articulos/entry/calculo-de-los-parametros-de-la-distribucion-de-weibull	12	7,36 %

Texto analizado:

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS

Evaluación de la confiabilidad mediante distribución de Weibull para la disponibilidad operacional de [maquinaria pesada de la Municipalidad Distrital de Namballe, San Ignacio](#) - Cajamarca

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

Autor:

Bach. Segundo Romelio Coronel Gavidía <https://orcid.org/0009-0003-2698-3279>

Asesor:

Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez <https://orcid.org/0000-0002-9018-9569>

Registro: UPA-PITIM0017

Bagua Grande Perú 2023

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mis padres que me apoyaron en todo momento y contribuyeron en momentos malos y momentos buenos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades y así poder salir adelante y no morir en el intento. También quiero dedicar este trabajo a mis hermanos, hermanas, amigos, que me ayudaron en todo momento para que este trabajo se haga realidad.

Segundo Romelio.

Agradecimiento

Al Ing. Eduar Jamis Mejía Vásquez, por sus grandes enseñanzas, parte de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracteriza. A la Universidad Politécnica de la Amazonia, y sus docentes de la [Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica](#), por las buenas enseñanzas y valores adquiridos, por sus palabras sabias, y sus conocimientos.

El autor.