

Análisis RAM para la toma de decisiones en equipos eléctricos del alimentador de subtransmisión Penipe de media tensión

RAM analysis for decision-making in electrical equipment of the Penipe medium voltage subtransmission feeder

- ¹ César Gallegos-Londoño  <https://orcid.org/0000-0002-8685-7501>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
cesar.gallegos@espoch.edu.ec
- ² Eduardo Hernández-Dávila  <https://orcid.org/0000-0003-4899-2371>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
Maestría en Mantenimiento
edhernandez@espoch.edu.ec
- ³ José Vladimir Marzumillaga Vázconez  <https://orcid.org/0009-0006-3954-9836>
Investigador independiente
vlady19970601@gmail.com
- ⁴ Melany Daniela Viscarra Núñez  <https://orcid.org/0009-0003-2302-4080>
Investigador independiente
melanydaniela456@gmail.com



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 10/05/2026

Revisado: 12/06/2026

Aceptado: 06/07/2026

Publicado: 20/07/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v9i3.3707>

Cítese:

Gallegos Londoño, C., Hernández Dávila, E., Marzumillaga Vázconez, J. V., & Viscarra Núñez, M. D. (2026). Análisis RAM para la toma de decisiones en equipos eléctricos del alimentador de subtransmisión Penipe de media tensión . ConcienciaDigital, 9(3), 78-97. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v9i3.3707>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons en la 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Palabras claves:

Fiabilidad,
distribución de
Weibull,
mantenibilidad,
disponibilidad,
equipos no
reparables.

Resumen

Introducción: la confiabilidad del suministro eléctrico depende en buena medida del comportamiento de los equipos no reparables instalados en las redes de distribución, cuya condición de falla implica reemplazo directo. En la Empresa Eléctrica, la ausencia de un análisis cuantitativo sistemático de estos equipos limitaba la planificación del mantenimiento a un enfoque mayormente reactivo. **Objetivo:** este estudio tuvo como objetivo aplicar metodologías de ingeniería de la fiabilidad en equipos no reparables del alimentador de media tensión del sector Penipe, para estimar indicadores que respalden la planificación del mantenimiento y la gestión de activos. **Metodología:** la investigación siguió un enfoque mixto, descriptivo y aplicado, a partir de una base de datos de más de 2500 eventos de falla registrados entre noviembre de 2023 y octubre de 2025. Los tiempos hasta la falla se ajustaron mediante una distribución de Weibull de dos parámetros, y los tiempos de reparación mediante una distribución Log.Normal, para calcular fiabilidad, mantenibilidad, tasa de fallos y disponibilidad. **Resultados:** los resultados muestran un parámetro de forma $\beta = 1,3$, que indica un proceso de desgaste gradual más que fallas aleatorias. El MTTF promedio fue de 562 h, con una dispersión mensual inferior al 4 %, y el MTTR promedio de 13,9 h, lo que se tradujo en una disponibilidad intrínseca promedio de 98 %. La proyección de disponibilidad en función del tiempo de operación confirmó este valor, con una estabilización por encima del 95 % después de las 300 horas. **Conclusiones:** se concluye que el alimentador analizado presenta un comportamiento de fallos identificable y una alta disponibilidad operativa, sostenida principalmente por tiempos de reparación cortos más que por la ausencia de fallas. El estudio aporta un procedimiento replicable para caracterizar cuantitativamente equipos no reparables a partir de registros administrativos existentes, sin necesidad de instrumentación adicional, y establece una línea base metodológica aplicable a otros alimentadores de la red. **Área de estudio general:** Mantenimiento. **Área de estudio específica:** Ingeniería de la Fiabilidad. **Tipo de estudio:** Artículo original.

Keywords:

Reliability,
Weibull

Abstract

Introduction: the reliability of electricity supply depends largely on the behavior of non-repairable equipment installed in

distribution,
maintainability,
availability, non-
repairable
equipment.

distribution networks, whose failure condition requires direct replacement. At *Empresa Eléctrica Rio*, the lack of a systematic quantitative analysis of this equipment limited maintenance planning to a mostly reactive approach. **Objective:** this study aimed to apply reliability engineering methodologies to non-repairable equipment on the medium-voltage feeder in the Penipe sector, to estimate indicators that support maintenance planning and asset management. **Methodology:** the research followed a mixed, descriptive, and applied approach, based on a database of more than 2500 failure events recorded between November 2023 and October 2025. Times to failure were fitted using a two-parameter Weibull distribution, and repair times using a Lognormal distribution, to calculate reliability, maintainability, failure rate, and availability. **Results:** the results show a shape parameter of $\beta = 1.3$, indicating a gradual wear-out process rather than random failures. The average MTTF was 562 h, with monthly dispersion below 4%, and the average MTTR was 13.9 h, resulting in an average intrinsic availability of 98%. The availability projection as a function of operating time confirmed this value, stabilizing above 95% after 300 hours. **Conclusions:** it is concluded that the analyzed feeder shows an identifiable wear-out behavior and high operational availability, sustained mainly by short repair times rather than the absence of failures. The study contributes a replicable procedure for quantitatively characterizing non-repairable equipment using existing administrative records, without the need for additional instrumentation, and establishes a methodological baseline applicable to other feeders in the network. **General field of study:** Maintenance. **Specific field of study:** Reliability Engineering. **Type of study:** Original article.

1. Introducción

La continuidad y calidad del servicio eléctrico son factores clave para el desarrollo económico y social de una región. Por ello, las empresas distribuidoras necesitan mantener niveles altos de fiabilidad en sus sistemas, lo que exige metodologías que optimicen la gestión de sus activos físicos. Entre ellas, el análisis *RAM (Reliability, Availability and Maintainability)* es una de las principales herramientas en la ingeniería de fiabilidad: estos indicadores nos ofrecen criterios para evaluar el comportamiento de

los equipos a lo largo de su ciclo de vida y respaldar decisiones técnicas, económicas y operativas (Ebeling, 2019; Smith, 1993).

El enfoque RAM no se limita al cálculo de indicadores estadísticos tradicionales como el MTBF (Tiempo medio entre fallos), El MOTBF (Tiempo operativo medio entre fallos), MTTF(tiempo medio hasta la falla se ocupa en equipos no reparables), MTTR (tiempo medio para reparar), incorpora modelos probabilísticos que permiten predecir el comportamiento futuro de los activos, permite estimar la probabilidad de falla, calcular el tiempo esperado de funcionamiento esto hace posible estrategias para el mantenimiento, renovación y restauración de equipos (Dhillon, 2006; O'Connor & Kleyner, 2011).

En el sector eléctrico, la fiabilidad de las redes de distribución afecta directamente la continuidad del suministro de energía eléctrica y la satisfacción de los usuarios (Brown, 2009). Una falla inesperada en un componente crítico puede causar interrupciones prolongadas, pérdidas económicas, costos de emergencia, afectación a clientes industriales y residenciales, y riesgos para el personal operativo (Billinton & Allan, 1984).

En la empresa eléctrica, una buena parte de los equipos instalados en las redes de distribución son no reparables (cuando fallan, se reemplazan, no se reparan). Por esto es necesario conocer con precisión el comportamiento estadístico de sus tiempos hasta la falla (MTTF), para poder establecer políticas de reposición preventiva.

Las empresas que cuentan con registros históricos de fallas y mantenimiento se podrían usarse para construir modelos predictivos de fiabilidad, pero sin un análisis cuantitativo sistemático esos datos no se traducen en información útil para la toma de decisiones. En la práctica, esto mantiene un enfoque reactivo: más mantenimiento correctivo, menor fiabilidad del sistema y peores indicadores de calidad del servicio (Moubray, 1997).

Este estudio propone aplicar modelos probabilísticos de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad con esta metodología se pueden estimar la fiabilidad, la probabilidad acumulada de falla, la densidad de probabilidad, la tasa de fallas y el Tiempo Medio para Fallar (MTTF), información que sirve para planificar el mantenimiento y gestionar el ciclo de vida de los activos (Abernethy, 2006).

Las empresas distribuidoras de energía trabajan bajo exigencias técnicas, económicas y regulatorias fuertes en torno a la continuidad del servicio que prestan. Si se gestionan bien los activos físicos reducen la cantidad de fallas con esto minimizar las interrupciones de servicio y se minimizan las pérdidas económicas, en el plano técnico, este estudio caracterizará estadísticamente los tiempos hasta la falla mediante la distribución que mejor se ajusta a los datos y con esta distribución se identificará las probabilidades de supervivencia o las probabilidades de que un equipo este reparado, entre otros (Nelson, 1982; ReliaSoft, 2014). En el plano institucional, los resultados aportan a la gestión de activos. En la actualidad no se cuenta con un análisis estadístico con los indicadores de la Ingeniería de la Fiabilidad.

El objetivo de esta investigación es aplicar metodologías de ingeniería de fiabilidad al análisis de los equipos no reparables de las redes de distribución de la Empresa Eléctrica, mediante modelos probabilísticos basados en las distribuciones que mejor se ajustan a los datos, para estimar indicadores de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad que apoyen la planificación del mantenimiento, la gestión de los activos y la toma de decisiones.

La ingeniería de fiabilidad ha crecido en las últimas décadas por la necesidad de aumentar la disponibilidad y seguridad de sistemas industriales complejos. En sectores como la generación eléctrica, el petróleo, la minería, la aviación y la manufactura usan metodologías RAM para gestionar mejor el mantenimiento y reducir costos por fallas imprevistas (Kececioglu, 2002).

La distribución de Weibull, propuesta por Weibull (1951) es uno de los modelos estadísticos más usados en este campo. Su parámetro de forma (β) permite modelar distintos mecanismos de falla, y su parámetro de escala (α) representa la vida característica del componente. Sin embargo, los datos pueden acercarse a otras distribuciones como: la exponencial, normal, log-normal, gamma, etc.

En los sistemas eléctricos de potencia, distintos estudios muestran que el análisis de la fiabilidad aplicado a transformadores, interruptores, fusibles, reconectores, aisladores, etc. Esto permitirá mejorar la planificación del mantenimiento y reducir las interrupciones (Billinton & Allan, 1984; Brown, 2009).

Esto va de la mano de la adopción de normas internacionales como la ISO 14224:2016 para la recopilación e intercambio de datos de la fiabilidad y mantenimiento y la familia de gestión de activos (International Organization for Standardization [ISO], 2016), la ISO 55000:2024 para la gestión de activos físicos (ISO, 2024), y la UNE-EN 13306:2018 terminología de mantenimiento (UNE Normalización Española, 2018).

Para el cálculo de indicadores RAM lo principal es tener un adecuado registro de datos de los fallos, que inicia con el tiempo de inicio y fin del fallo (fecha y hora), Modo de fallo, Mecanismo de fallo, Causa de fallo, Método de detección del fallo, consecuencias del fallo, acción correctiva inmediata, esto involucra realizar un análisis forense de la falla (ISO, 2016).

Equipos no reparables son aquellos que deben ser reparados al ocurrir un fallo (UNE Normalización Española, 2018), los indicadores más utilizados para equipos no reparables son: el tiempo medio hasta el fallo (MTTF), el tiempo medio para la reparación, en este caso el recambio (MTTR) y la disponibilidad intrínseca. Cabe mencionar que los indicadores mencionados son calculados con datos históricos los cuales nos indican que tan bien o mal estuvimos, el análisis RAM va más allá podemos proyectar los datos de fiabilidad, mantenibilidad al futuro obteniendo estimaciones del probable desempeño de los equipos en un tiempo futuro.

Una lista de los equipos no reparables en líneas de distribución es:

- disyuntores
- reconector

- seccionador
- seccionador fusible
- aisladores
- herrajes
- cables eléctricos
- postes de hormigón

Con los tiempos de operación hasta el fallo (TO) y los tiempos de recambio (TR) se inicia el cálculo de los indicadores básicos de la fiabilidad.

$$MTTF = \frac{\Sigma TO}{\# \text{ De recambios}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$MTTR = \frac{\Sigma TR}{\# \text{ De recambios}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$Di = \frac{\Sigma TO}{\Sigma TO + \Sigma TR} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

TO Tiempo operativo hasta el fallo

TR Tiempo de recambio

Di Disponibilidad intrínseca

Para las proyecciones de la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad se toma como base los tiempos hasta el fallo y los tiempos de restauración, y el primer paso es realizar una prueba de ajuste de bondad para encontrar cual es la mejor distribución que se ajusta a los datos (Yanez et al., 2004; Fala, 2022). Las funciones para este estudio de la fiabilidad son:

- Función de la densidad de probabilidad $f(t)$.
- Función de la densidad de probabilidad acumulada o Infiabilidad $F(t)$
- Función de la densidad de probabilidad acumulada inversa $R(t)$
- Función del Riego o Tasa de fallas instantánea $\lambda(t)$.

En la **Figura1** se observa el comportamiento de las funciones de la fiabilidad para las distintas distribuciones de probabilidad.

Las fórmulas de las funciones de la fiabilidad para cada las distribuciones más utilizadas se las ve en la **Tabla 1**.

Tabla 1
Distribuciones para el estudio de la fiabilidad

Descripción	Exponencial	Weibull	Normal	Gamma
Función de densidad de probabilidad de fallo $f(t)$	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$f(t) = \frac{\beta(t)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$f(t) = \frac{t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t}{\beta}}$

Tabla 1

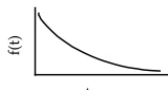
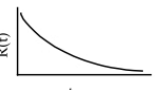
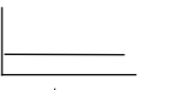
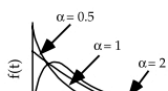
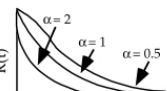
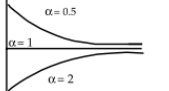
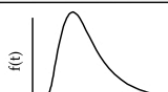
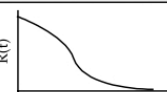
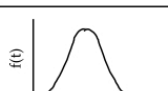
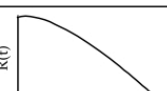
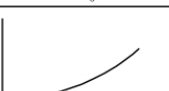
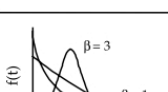
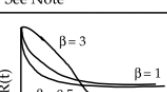
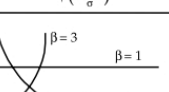
Distribuciones para el estudio de la fiabilidad (continuación)

Descripción	Exponencial	Weibull	Normal	Gamma
Función de distribución acumulada de probabilidad de fallo, F(t)	$F(t) = e^{-\lambda t}$	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \right) dt$	$F(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt$
Función de fiabilidad R(t)	$R(t) = 1 - F(t)$	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$R(t) = 1 - F(t)$	$R(t) = 1 - F(t)$
El riesgo $\lambda(t)$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$

En la **Figura 1** se observa el comportamiento de las funciones de la fiabilidad para las distintas distribuciones de probabilidad.

Figura 1

Funciones de la fiabilidad y su comportamiento para varias distribuciones

TYPE OF DISTRIBUTION	PROBABILITY DENSITY FUNCTION, f(t)	RELIABILITY FUNCTION R(t) = 1 - f(t)	HAZARD FUNCTION h(t) = $\frac{f(t)}{R(t)}$
EXPONENTIAL	 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	 $R(t) = e^{-\lambda t}$	 $h(t) = \lambda = \theta^{-1}$
GAMMA	 $f(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (t\lambda)^{\alpha-1} e^{-\lambda t}$	 $R(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt$	 $h(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\lambda t}}{\int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt}$
LOGNORMAL	 $f(t) = \frac{1}{\sigma t (2\pi)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2}$	 $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$ See Note	 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}$
NORMAL	 $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2}$	 $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$ See Note	 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}$
WEIBULL	 $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]}$	 $R(t) = e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]}$	 $h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$

Para las proyecciones de la disponibilidad es necesario estimar la tasa instantánea de fallas $\lambda(t)$ u la tasa de reparaciones $u(t)$ donde:

$$D(t) = \frac{u(t)}{u(t)+\lambda(t)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$D(t)$ Disponibilidad proyectada

$u(t)$ Tasa de reparaciones instantánea

$\lambda(t)$ Tasa de fallos instantánea

2. Metodología

Esta investigación tiene un enfoque mixto, cuantitativo y cualitativo, de tipo descriptivo y aplicado. Se basa en el análisis de datos históricos de fallas registrados por la Empresa Eléctrica en sus líneas de distribución eléctrica, sin intervención directa sobre los equipos analizados. El componente cuantitativo se usó para aplicar herramientas estadísticas de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y tasa de fallas. El componente cualitativo sirvió para interpretar esos resultados se enfocan en el comportamiento operativo de los equipos no reparables.

El diseño y aplicación correcta de las técnicas de la Ingeniería de la Fiabilidad es una herramienta adecuada para generar indicadores que sirvan para la toma de decisiones en equipos no reparables.

La investigación se centró en un alimentador de media tensión del sector de Penipe, operado por la Empresa Eléctrica Riobamba S.A., en la provincia de Chimborazo, Ecuador. Este análisis abarcó únicamente unas líneas de distribución en media tensión, considerando los equipos no reparables más representativos y de mayor uso en este tipo de infraestructura. La base de datos cubre registros históricos entre noviembre de 2023 y octubre de 2025, con más de 2500 eventos de falla. Cada registro incluye la fecha y hora de inicio y fin del evento, lo que permitió calcular los tiempos de indisponibilidad del sistema.

El proceso realizado es el siguiente:

- adquisición de datos.
- análisis y filtración de los datos.
- revisión de las normativas aplicables
- cálculo de los indicadores básicos de la fiabilidad (MTTF, MTTR, Disponibilidad intrínseca).
- realizar la prueba de ajuste de bondad
- cálculo de los indicadores probabilísticos
- toma de decisiones.

Se tomaron los datos de los tiempos hasta el fallo y los tiempos de recambio en un período de un año con ello se calcularon los indicadores presentados en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Distribuciones para el estudio de la fiabilidad

MES	MTTF (h)	MTTR (h)	D-Intrínseca
Enero	567	15	97%
Febrero	562	13	98%
Marzo	554	21	96%
Abril	572	4	99%
Mayo	560	15	97%
Junio	556	20	97%
Julio	561	14	98%
Agosto	564	11	98%
Septiembre	560	13	98%
Octubre	563	14.8	97%
Noviembre	561	14.5	97%
Diciembre	564	11.5	98%
Media	562	13.9	98%

Con los mismos datos históricos se realiza la prueba de ajuste de bondad con el método de Kolmogorov Smirnov la distribución ganadora para los tiempos de operación hasta el fallo es la distribución de Weibull, las funciones de la fiabilidad se muestran en la **Figura 3**.

Para los tiempos de reparación luego de realizar la prueba de ajuste de bondad la distribución que mejor se ajustó a los datos también fue la distribución de Log.Normal, obteniendo las gráficas de probabilidad de reparaciones $M(t)$ y tasa de reparaciones $u(t)$ de la **Figura 4**.

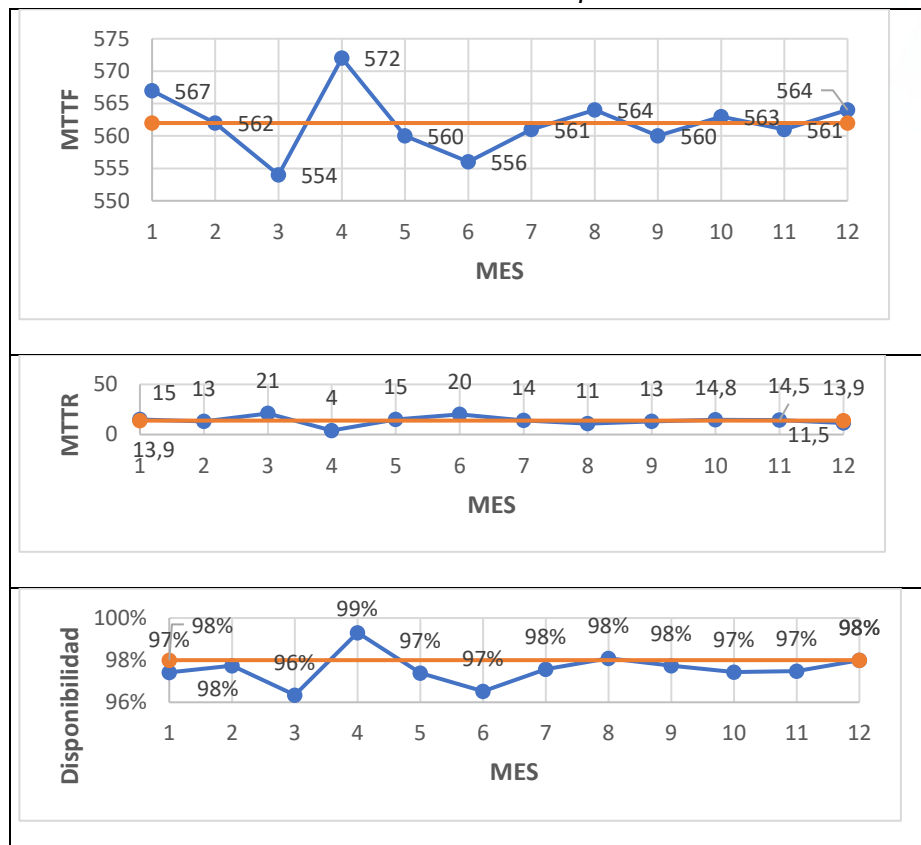
En la **Figura 5** se muestran las proyecciones de la disponibilidad en base a los datos de tiempos de operación y tiempos de reparación.

3. Resultados

Los indicadores de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los doce meses evaluados muestran un comportamiento estable. La **Tabla 1** resume los valores mensuales del Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF), el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y la disponibilidad intrínseca.

Se muestran las gráficas del MTTF, MTTR y disponibilidad intrínseca en la **Figura 2**.

Figura 2
Indicadores básicos de la fiabilidad



El MTTF osciló entre 554 h y 572 h, con un promedio anual de 562 h. La diferencia entre el valor mínimo y el máximo fue de solo 18 horas (3,2 % del promedio), lo que indica una frecuencia de fallas bastante estable durante el período. El valor más alto se dio en abril (572 h) y el más bajo en marzo (554 h), aunque esta diferencia es pequeña y no representa un deterioro real del sistema.

El MTTR varió entre 4 h y 21 h, con un promedio anual de 13,9 h. Este indicador tuvo más variación que el MTTF: el valor más bajo fue en abril (4 h) y el más alto en marzo (21 h). El resto del año, los tiempos de reparación se mantuvieron entre 11 h y 15 h, lo que sugiere que el personal de mantenimiento restablece el servicio en plazos relativamente constantes.

La Disponibilidad Intrínseca promedió 98 %, con valores mensuales entre 96 % y 99 %. Abril tuvo la disponibilidad máxima (99 %), coincidiendo con el mejor MTTF y el mejor MTTR; marzo tuvo la mínima (96 %), coincidiendo con el peor MTTF y el peor MTTR. Esto confirma que la disponibilidad depende de la combinación entre frecuencia de fallas y tiempo de reparación.

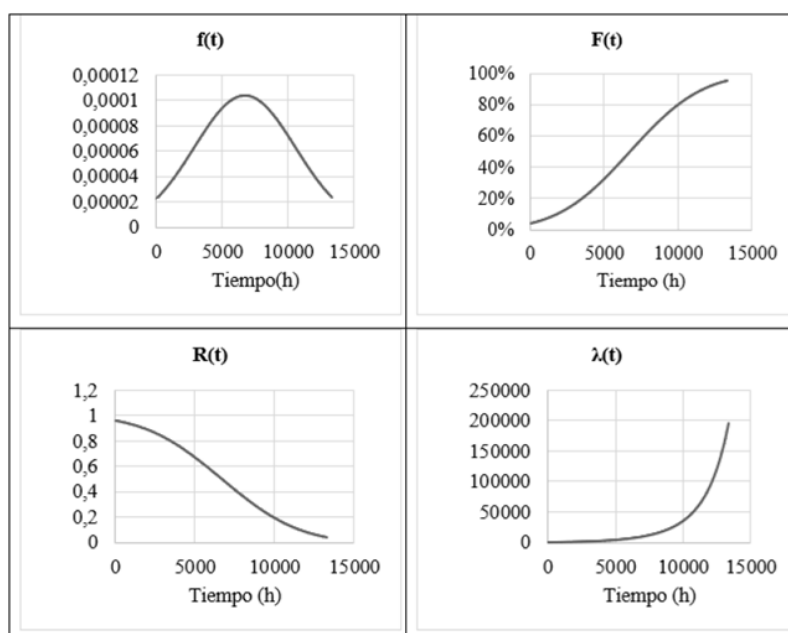
En promedio, el sistema opera 562 horas por cada ciclo y necesita 13,9 horas para recuperarse tras una falla: el tiempo de reparación representa apenas 2,5 % del tiempo de operación, lo que explica la alta disponibilidad del período.

En conjunto, el activo muestra alta fiabilidad y disponibilidad, con una mantenibilidad que limita el impacto de las intervenciones correctivas sobre el servicio. La poca dispersión del MTTF y de la disponibilidad indica condiciones de operación y estrategias de mantenimiento consistentes durante los doce meses.

Una disponibilidad intrínseca promedio de 98 % es un resultado sólido en ingeniería de fiabilidad: indica que las fallas son poco frecuentes y que, cuando ocurren, se corrigen en tiempos que no afectan de forma notable la continuidad del proceso. La estabilidad del MTTF a lo largo del año sugiere además que el equipo no está entrando en una etapa acelerada de desgaste, algo coherente con un programa de mantenimiento efectivo. Estos resultados respaldan mantener las prácticas actuales, con seguimiento puntual de los meses de menor fiabilidad (marzo y junio) para identificar posibles causas operacionales o ambientales detrás del aumento de fallas y tiempos de reparación.

A continuación, se presenta el análisis de las curvas obtenidas mediante el ajuste de una distribución de Weibull de dos parámetros, con parámetro de forma $\beta = 1,3$ y parámetro de escala $\eta = 2,04$. El valor de escala debe interpretarse en las mismas unidades usadas en el ajuste; en las gráficas, el tiempo se expresa en horas de operación, como referencia la **Tabla 2**.

Figura 3
Funciones de la Fiabilidad



Curva de fiabilidad, $R(t)$ en la **Figura 3** se presenta la función de fiabilidad $R(t)$, que representa la probabilidad de que el equipo opere sin fallas hasta un tiempo t , esta curva muestra una disminución continua de la fiabilidad conforme aumenta el tiempo de operación. Al inicio, la probabilidad de funcionamiento es cercana al 100 %; hacia el final del período analizado (alrededor de 14 000 h) cae a valores cercanos al 5 %. La pendiente es suave en las primeras horas y se vuelve más pronunciada después, es decir, la pérdida de fiabilidad es progresiva, no abrupta, este comportamiento es consistente con $\beta = 1,3$: cuando $\beta > 1$, la probabilidad de falla aumenta con el tiempo por el deterioro gradual de los componentes. Esto ubica al equipo en la etapa de desgaste inicial, donde las fallas empiezan a no ser aleatorias, esto significa que la caída de la fiabilidad es predecible, lo que permite definir políticas de reemplazo o mantenimiento preventivo antes de que la probabilidad de falla se vuelva alta.

Curva de tasa de fallos, $\lambda(t)$ en la **Figura 3** también se muestra la tasa instantánea de fallos $\lambda(t)$, que indica la velocidad con la que ocurren las fallas en función del tiempo de operación, la curva es creciente: parte de valores bajos en las primeras horas y aumenta de forma progresiva, con un incremento marcado hacia el final del período, lo que indica una aceleración en la frecuencia esperada de fallas, este comportamiento corresponde a una distribución de Weibull con $\beta = 1,3$, donde la función de riesgo es creciente:

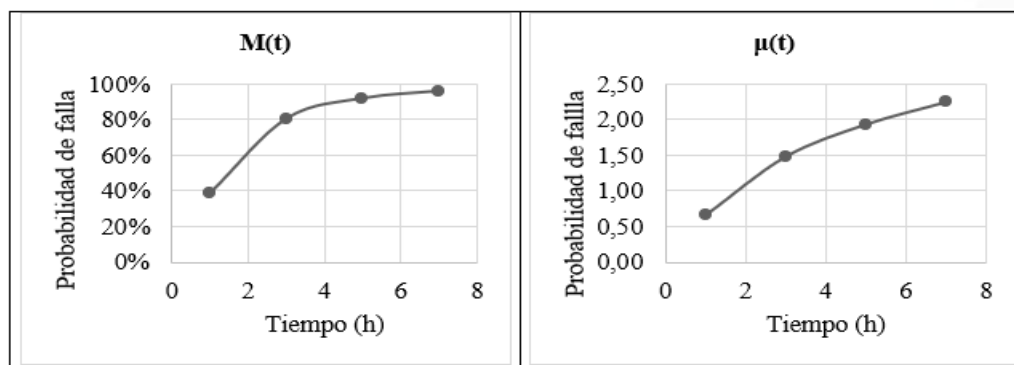
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \text{ (Ecuación 5)}$$

El exponente positivo ($\beta - 1 = 0,3$) hace que la tasa de fallos aumente con el tiempo, Esto indica que las fallas están asociadas a procesos de degradación, el incremento acelerado de $\lambda(t)$ en la etapa final sugiere que seguir operando sin intervención preventiva aumentaría la probabilidad de fallas correctivas, con el consiguiente costo adicional de mantenimiento.

En el estudio de la mantenibilidad de la **Figura 4** presenta la función de mantenibilidad $M(t)$, que representa la probabilidad de que una reparación se complete antes de un tiempo, la curva es creciente y asintótica, propia de la función de distribución acumulada de una Log.Normal. En la primera hora, la probabilidad acumulada de restablecer el equipo es cercana al 40 %, es decir, buena parte de las intervenciones toma más de una hora en completarse, entre las 2 y las 4 horas la mantenibilidad sube con rapidez, llegando a cerca de 80 % alrededor de las tres horas la mayoría de las acciones correctivas se resuelve en ese rango. A partir de las 5 horas la pendiente se reduce y la curva se estabiliza, alcanzando 95-98 % hacia las 7 horas; pasado ese punto, es poco probable que una reparación siga pendiente.

Figura 4

Funciones de la Mantenibilidad



Esto refleja una mantenibilidad alta, con la mayoría de las intervenciones resueltas en tiempos cortos. La forma de la curva también muestra la asimetría típica de la Log.Normal pocas reparaciones complejas toman bastante más tiempo que el promedio, y son las que estiran la cola de la distribución.

La **Figura 4** se muestra la tasa instantánea de reparaciones $\mu(t)$, que describe la velocidad con la que se completan las reparaciones a lo largo de la intervención. la curva crece de forma progresiva durante todo el intervalo. al inicio la tasa es baja, porque las primeras horas se dedican sobre todo a diagnóstico, localización de la avería, preparación de herramientas y desmontaje. Conforme avanza la intervención, la tasa sube y llega a sus valores más altos entre las 5 y 7 horas, una vez identificada la causa y ejecutada la reparación principal, la probabilidad de terminar con éxito aumenta de forma notable.

$M(t)$ y $\mu(t)$ describen un proceso de mantenimiento eficiente, la mantenibilidad sube rápido en las primeras horas y la tasa de reparaciones también aumenta conforme avanza la intervención, lo que confirma que la mayoría de las reparaciones se resuelven rápido y con una probabilidad creciente de éxito a medida que progresan.

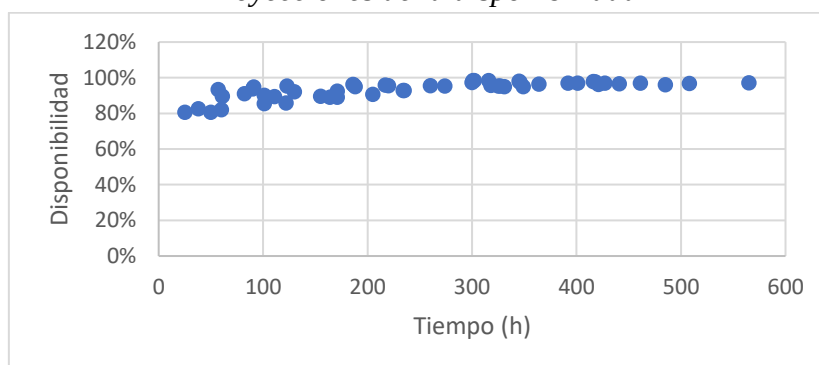
La proyección de la disponibilidad de los alimentadores eléctricos que se presenta en la **Figura 5** muestra la proyección de disponibilidad de los alimentadores en función del tiempo de operación. La tendencia es creciente y estable, con valores que van de aproximadamente 80 % a 99 % durante el intervalo analizado.

En las primeras horas (50 a 120 h), la disponibilidad muestra mayor dispersión, con valores entre 80 % y 95 %, lo que apunta a la influencia de fallas iniciales y las actividades correctivas asociadas. A medida que avanza el tiempo de operación, esa dispersión se reduce y los valores se concentran entre 95 % y 99 %. A partir de las 300 h, la mayoría de los datos se mantiene por encima del 95 %, señal de que el sistema entra en un régimen de operación con alta continuidad del servicio.

Esta tendencia ascendente es coherente con los resultados de fiabilidad y mantenibilidad ya descritos: un MTTF elevado, un MTTR reducido y una disponibilidad intrínseca promedio de 98 %. En otras palabras, las fallas siguen ocurriendo, pero los tiempos de

reparación son lo bastante cortos como para no afectar de forma significativa la operación de los alimentadores se observa en la **Figura 5**.

Figura 5
Proyecciones de la disponibilidad



En conjunto, la proyección muestra que los alimentadores mantienen un nivel alto de disponibilidad durante la mayor parte del período analizado, lo cual respalda las estrategias de mantenimiento actuales. Bajo condiciones similares de operación y mantenimiento, es razonable esperar que la disponibilidad futura se mantenga cercana al 98 %, un valor adecuado para sistemas de distribución eléctrica.

4. Discusión

Los resultados son representativos del comportamiento de los equipos no reparables de un único alimentador de media tensión (sector Penipe), durante un período de veinticuatro meses de registro. Dentro de ese alcance, los indicadores permiten:

- Establecer una línea base cuantitativa de MTTF, MTTR y disponibilidad para este alimentador específico.
- Sustentar decisiones de mantenimiento preventivo para el tipo de equipo analizado, en las condiciones operativas y ambientales propias del sector Penipe.
- Servir como referencia metodológica para replicar el análisis en otros alimentadores.

En conjunto, los resultados ofrecen una base cuantitativa sólida para la gestión de mantenimiento del alimentador estudiado, pero su generalización a otros contextos de la red requeriría ampliar el análisis a un mayor número de alimentadores y un horizonte temporal más extenso.

Respecto a las proyecciones de la Fiabilidad se tiene: El valor $\beta = 1,3$ obtenido coincide con lo reportado en la literatura para componentes eléctricos de distribución sujetos a desgaste gradual (aislamiento, contactos, corrosión), y no con fallas infantiles ni con una tasa constante (Ebeling, 2019; O'Connor & Kleyner, 2011). Esto respalda técnicamente

la recomendación de mantenimiento preventivo, en línea con el enfoque RCM de Moubray (1997).

Los resultados son válidos para el alimentador de Penipe y los equipos no reparables analizados, dentro del período de registro.

Limitaciones:

- Un $\beta = 1,3$ indica desgaste leve a moderado; con solo dos años de datos, no se puede confirmar si esta tendencia se mantiene o se acelera a más largo plazo.
- El ajuste no incorpora variables ambientales (clima, vegetación, descargas atmosféricas) que también influyen en la falla de redes de distribución (Brown, 2009), por lo que su efecto queda mezclado dentro del parámetro estimado.
- El modelo asume un mecanismo de falla homogéneo; si el conjunto de equipos analizado incluye componentes de distinta antigüedad o fabricante, el β estimado podría ser un promedio que oculte comportamientos diferentes entre subgrupos.
- Los resultados no son directamente extrapolables a otros alimentadores con condiciones operativas distintas.

Los tiempos de reparación obtenidos (mantenibilidad cercana al 80 % a las 3 h y 95-98 % a las 7 h) son consistentes con lo que Dhillon (2006) describe para mantenimiento correctivo en redes de distribución, donde el grueso de las intervenciones se concentra en unas pocas horas y una cola de reparaciones complejas alarga la duración promedio. El ajuste a una distribución Log.Normal.

La asimetría de la curva presenta muchas reparaciones rápidas y pocas muy largas esto es coherente con lo reportado por para intervenciones en media tensión, donde las fallas de fácil acceso se resuelven en poco tiempo mientras que las que requieren desplazamiento a zonas rurales o reemplazo de componentes especializados generan la cola larga de la distribución. esto sugiere que el comportamiento observado en el alimentador Penipe no es un caso aislado, sino un patrón típico del tipo de infraestructura analizada.

Alcance: los resultados caracterizan el proceso de reparación del alimentador de Penipe durante el período de registro, y son útiles para dimensionar recursos de mantenimiento (personal, herramientas, tiempos de respuesta esperados).

Limitaciones:

- El ajuste a Log.Normal describe el conjunto de reparaciones, pero no distingue entre tipos de falla; reparaciones muy distintas entre sí (falla de aislador vs. falla de conductor, por ejemplo) podrían estar generando esa cola larga sin que el modelo lo diferencie.
- Los tiempos de reparación dependen de factores logísticos (distancia, disponibilidad de cuadrillas, acceso al sector) que no están modelados explícitamente y pueden variar en el tiempo sin que el análisis lo capture.

- El período de dos años no permite evaluar si la eficiencia de reparación se mantiene estable o cambia con variaciones en la dotación de personal o en los protocolos de la empresa.
- Los valores no son directamente extrapolables a alimentadores con distinta accesibilidad geográfica o tipo de equipo.

La disponibilidad proyectada (80-99 %, estabilizándose cerca de 98 % después de las 300h es consistente con lo que Billinton & Allan (1984) describen como comportamiento esperado en sistemas de distribución bien mantenidos: una fase inicial de mayor variabilidad, seguida de un régimen estable una vez que el sistema "absorbe" las fallas tempranas y las acciones correctivas asociadas. La dispersión observada entre 50 y 120 h es coherente con esa lectura, más que con un problema de calidad del componente.

El hecho de que la disponibilidad proyectada alcanza el mismo valor que la disponibilidad intrínseca calculada directamente de los datos históricos (98 %) es una señal de consistencia interna del análisis: dos caminos distintos del cálculo puntual y proyección temporal llegan al mismo número. Esto respalda la robustez de la estimación, en línea con lo que O'Connor & Kleyner (2011) señalan sobre la importancia de validar los indicadores de fiabilidad mediante más de un enfoque metodológico.

Alcance: la proyección describe el comportamiento esperado de disponibilidad para el alimentador de Penipe bajo el supuesto de que las condiciones de operación y mantenimiento observadas en el período de estudio se mantienen constantes. Es útil como referencia para justificar la continuidad de las prácticas actuales de mantenimiento y como línea base para comparar con proyecciones futuras.

Limitaciones:

- El modelo asume condiciones de mantenimiento y operación constantes. Cambios futuros en la dotación de personal, protocolos, o en las condiciones ambientales del sector no están contemplados y podrían modificar la disponibilidad real.
- La dispersión inicial (80-95 % en las primeras 120 h) depende en parte del tamaño de muestra disponible para ese tramo; si hubo pocos eventos registrados en esa ventana, la variabilidad podría estar sobreestimada por el efecto de muestra pequeña más que por un fenómeno físico real.
- Al no incorporar variables ambientales, la proyección no distingue si la disponibilidad futura podría verse afectada por factores estacionales (época de lluvias, descargas atmosféricas) que no se repiten de manera uniforme año a año.

5. Conclusiones

- El análisis de la fiabilidad aplicado a los equipos no reparables del alimentador de Penipe convirtió más de 2500 registros de falla en un modelo cuantitativo capaz de describir y proyectar el comportamiento del sistema. Con esto se cumple el objetivo general planteado para esta investigación.

- El ajuste de Weibull, con $\beta = 1,3$, muestra que las fallas no son aleatorias ni obedecen a defectos de fabricación: responden a un desgaste gradual. En la práctica, esto significa que el mantenimiento no puede seguir un enfoque reactivo o de sustitución al azar. Debe orientarse a intervalos de reemplazo preventivo calculados a partir del comportamiento real del activo, no de recomendaciones genéricas del fabricante.
- Un MTTF estable (562 h en promedio, con dispersión mensual menor al 4 %) junto con un MTTR bajo (13,9 h) explica la disponibilidad intrínseca de 98 % obtenida. Esto muestra algo importante: para este equipo, la disponibilidad depende menos de evitar la falla y más de qué tan rápido se repara.
- La proyección de disponibilidad converge al mismo valor calculado directamente de los datos históricos. Dos caminos distintos llegan al mismo número, lo que da soporte adicional al modelo más allá de un simple ajuste estadístico.
- El aporte central de este trabajo es mostrar que se puede caracterizar el comportamiento de falla y reparación de equipos no reparables usando solo registros administrativos existentes, sin instrumentación adicional ni intervención directa sobre los equipos. Esto les da a las empresas con estructuras de datos parecidas, un procedimiento replicable para pasar de un mantenimiento basado en la experiencia a uno basado en evidencia estadística, sin inversión adicional en monitoreo.
- Los resultados del alimentador de Penipe funcionan como línea base: el mismo procedimiento (depuración de registros, ajuste de Weibull, ajuste de Log.Normal, proyección de disponibilidad) puede aplicarse a otros alimentadores de la red. Eso abriría la puerta a comparar el desempeño entre circuitos y a priorizar recursos de mantenimiento donde el análisis lo indique, en vez de repartirlos de manera uniforme.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (*copyright*)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (*copyright*).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la [Taxonomía CRediT](#) para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo.

Conceptualización: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.

Curación de datos: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.

Análisis formal: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.

Adquisición de fondos: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Investigación: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Metodología: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Administración del proyecto: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Recursos: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Software: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Supervisión: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Validación: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Visualización: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Escritura borrador original: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.
Redacción revisión y edición: Gallegos, C.M., Hernández, E. S., Marzumillaga, J. V. & Viscarra, M. D.

Discusión de resultados: todos los autores participaron activamente en el análisis crítico e interpretación de los hallazgos presentados.

Revisión y aprobación: todos los autores revisaron minuciosamente el manuscrito, realizaron las correcciones pertinentes y otorgaron su aprobación formal para la versión final del trabajo.

Divulgación de la delegación a la IA generativa

La responsabilidad del manuscrito final recae íntegramente en los autores. Las herramientas GAI no figuran como autores y no asumen responsabilidad por los resultados finales.

Declaración presentada por: César Gallegos-Londoño

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

10. Referencias bibliográficas

- Abernethy, R. B. (2006). *The new weibull handbook* (5th ed.). Published by Robert B. Abernethy. <https://dl.icdst.org/pdfs/files3/c64437fb3adfa5efafd1cb89063cb323.pdf>
- Billinton, R. & Allan, R. N. (1984). *Reliability evaluation of power systems*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-7731-7>
- Brown, R. E. (2009). *Electric power distribution reliability* (2nd.edition). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780849375682/electric-power-distribution-reliability-lee-willis-richard-brown>
- Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. CRC Press. https://books.google.com.ec/books/about/Maintainability_Maintenance_and_Reliability.html?id=v2HLBQAAQBAJ&redir_esc=y
- Ebeling, C. E. (2019). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Waveland Press. <https://www.waveland.com/browse.php?t=392>

- Fala León, J. P. (2022). *Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo programado para la empresa de lácteos Campo Fino de la ciudad de Salcedo utilizando la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad* [Trabajo de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16222>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2016). *ISO 14224:2016 - Industrias del petróleo, petroquímica y gas natural - Recopilación e intercambio de datos de fiabilidad y mantenimiento de equipos (3ra edición)*. <https://www.iso.org/standard/64076.html>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2024). *ISO 55000:2024 - Norma de Gestión de Activos*. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/08/30/83053.html>
- Kececioglu, D. B. (2002). *Reliability engineering handbook* (Vol. 1). DEStech Publications. https://books.google.com.ec/books/about/Reliability_Engineering_Handbook.html?id=IV6_GCFVWIIQC&redir_esc=y
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press. https://books.google.com.ec/books/about/Reliability_centered_Maintenance.html?hl=es&id=bNCVF0B7vpIC&redir_esc=y
- Nelson, W. B. (1982). *Applied life data analysis*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=>
- O'Connor, P. D. & Kleyner, A. (2011). *Practical reliability engineering (1st ed.)*. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119961260>
- ReliaSoft. (2014). *Life data analysis reference*. ReliaSoft Publishing. <https://es.scribd.com/doc/310085912/Life-Data-Analysis-Reference>
- Smith, D. J. (1993). *Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers (4th edition)*. Butterworth-Heinemann. https://books.google.com.ec/books/about/Reliability_Maintainability_and_Risk.html?id=GxABBQAAQBAJ&redir_esc=y
- UNE Normalización Española. (2018). *UNE-EN 13306:2018 - terminología del mantenimiento*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060338>
- Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18(3), 293-297. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>
- Yanez Medina, M., Gómez de la Vega, H., & Valbuena Choururio, G. (2004). *Ingeniería de confiabilidad y análisis probabilístico del riesgo*. Editor Reliability and Risk Management S. A. <https://www.passeidireto.com/es/content/132775977/lectura-libro-completo-r-2-m-confiabilidad?>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.

