

Análisis estadístico de confiabilidad para equipos de elevación tipo Manlift (Plataforma de elevación para trabajo en alturas)

Edwin Alexander Rativa Sáenz,

Juan Esteban Espinosa Triana

Director: Msc Fred Geovanny Murillo R

Coodirector: Mg. Miguel Angel Urian T

Dirección de Posgrados, Universidad ECCI, Especialización en Gerencia de  
Mantenimiento

Bogotá 2021

**Análisis estadístico de confiabilidad para equipos de elevación tipo Manlift  
(Plataforma de elevación para trabajo en alturas)**

Edwin Alexander Rativa Sáenz

Código estudiantil: 99215

Juan Esteban Espinosa Triana

Código estudiantil: 99003

Director: Msc Fred Geovanny Murillo R

Coodirector: Mg. Miguel Angel Urian T

Dirección de Posgrados, Universidad ECCI, Especialización en Gerencia de  
Mantenimiento

Bogotá 2021

## Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	3
Enumeración de tablas.....	7
Enumeración de figuras.....	8
Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
1 Título de la investigación.....	13
2 Problema de investigación.....	14
2.1 Descripción del problema.....	14
2.2 Planteamiento del problema.....	14
2.3 Sistematización del problema.....	15
3 Objetivos de la investigación.....	16
3.1 Objetivo General.....	16
3.2 Objetivos Específicos.....	16
4 Justificación y delimitación.....	17
4.1 Justificación.....	17
4.2 Delimitación.....	18
4.3 Limitaciones.....	18

5	Marco conceptual .....	19
5.1	Estado del arte .....	19
5.1.1	Estado del arte Nacional .....	19
5.1.2	Estado del arte internacional .....	21
5.2	Marco Teórico.....	27
5.2.1	¿Qué es un Manlift? .....	27
5.2.2	Traccess 170, equipo de elevación de personal (Manlift) .....	29
5.2.3	¿Qué es la Ingeniería de Confiabilidad?.....	36
5.2.4	¿Qué es el Análisis Estadístico? .....	37
5.2.5	¿Qué son las Distribuciones continuas de probabilidad aplicadas a la confiabilidad?.....	38
5.2.6	¿Qué es la distribución de Weibull?.....	39
5.2.7	¿Qué es la Aproximación de Rangos medios?.....	43
5.2.8	¿Qué Son Los Mínimos Cuadrados?.....	43
5.2.9	¿Qué son las Pruebas de bondad de ajuste?.....	43
5.3	Marco normativo y legal.....	45
6.	Diseño de la metodología y cronograma.....	48
6.1.	Tipo de investigación .....	48
6.1.1.	Fuentes de obtención de información.....	49
6.1.3	Metodología de la investigación .....	50

6.1.4. Recopilación de la información .....	53
7. Desarrollo del análisis estadístico .....	57
7.1 Obtención y organización de base de datos.....	57
7.1.1 Selección de datos .....	57
7.1.2 Limpieza de datos .....	58
7.2 Función inicial de densidad de probabilidad .....	63
7.2.1. Distribución Normal.....	67
7.2.2 Distribución de Weibull 2P .....	75
7.2.2.2 Regresión lineal .....	78
7.2.3 Distribución Log Normal .....	86
7.2.4 Pruebas de Bondad de Ajuste .....	91
7.2.5 Crecimiento de la confiabilidad – Método de Duane.....	59
7.3 Análisis financiero basado en resultado estadístico.....	98
7.3.1. Datos clave .....	99
7.3.2. Organización de datos .....	99
7.3. Tabla de inversión vs costo de acuerdo a horómetro .....	101
7.4. Tabla de inversión vs costo de acuerdo a especialidad .....	108
7.5. Tabla de inversión vs costo de acuerdo a costo de mantenimiento total .....	109
8. Impactos alcanzados / esperados .....	113
9. Conclusiones .....	115

10. Recomendaciones .....	118
Bibliografía .....	119

**Enumeración de tablas**

Tabla 1.....	31
Tabla 2.....	42
Tabla 3.....	59
Tabla 4.....	60
Tabla 5.....	62
Tabla 6.....	72
Tabla 7.....	74
Tabla 8.....	88
Tabla 9.....	89
Tabla 10.....	90
Tabla 11.....	92
Tabla 12.....	94
Tabla 13.....	96
Tabla 14.....	99
Tabla 15.....	103
Tabla 16.....	107
Tabla 17.....	108
Tabla 18.....	111

**Enumeración de figuras**

Figura 1.....	28
Figura 2.....	28
Figura 3.....	30
Figura 4.....	32
Figura 5.....	34
Figura 6.....	35
Figura 7.....	44
Figura 8.....	50
Figura 9.....	53
Figura 10.....	54
Figura 11.....	54
Figura 12.....	60
Figura 13.....	61
Figura 14.....	62
Figura 15.....	63
Figura 16.....	64
Figura 17.....	66
Figura 18.....	67
Figura 19.....	68
Figura 20.....	69
Figura 21.....	70
Figura 22.....	73



Figura 23.....	75
Figura 24.....	76
Figura 25.....	77
Figura 26.....	78
Figura 27.....	79
Figura 28.....	80
Figura 29.....	81
Figura 30.....	83
Figura 31.....	84
Figura 32.....	85
Figura 33.....	86
Figura 34.....	87
Figura 35.....	93
Figura 36.....	95
Figura 37.....	104

## Resumen

El presente documento ilustra la elaboración de un análisis estadístico de confiabilidad de acuerdo a los datos históricos de falla, para el equipo de elevación de personas *Manlift Traccess 170*, esto con el fin de determinar el estado actual de dichos activos y en base al análisis determinar acciones de mejora en la gestión de mantenimiento.

Se inicia con la obtención de todos los datos correspondientes al activo, referente a las fallas reportadas en el software de mantenimiento, para luego ser ordenados, filtrados y seleccionados la información más útil para el estudio. Luego, se emplea tres distribuciones estadísticas (Normal, Weibull 2P y Log Normal) para describir el comportamiento de las fallas, determinando las funciones de confiabilidad adecuadas para el análisis. A través de pruebas de bondad de ajuste (Shi cuadrado y K-S) se selecciona el modelo más acorde a los datos reales, logrando predecir el comportamiento de las fallas. Después de obtenidos los resultados por el análisis se determina el impacto, la relevancia de los mismos y se traslada esta información a un análisis financiero que permite reflejar la utilidad del análisis de confiabilidad. Finalmente se obtienen conclusiones de ambos análisis realizados.

### **Palabras clave:**

*Distribución Normal, Distribución Weibull, Distribución Log Normal Confiabilidad, , Disponibilidad, Manlift, Bondad de ajuste, Análisis financiero.*

## Abstract

This document illustrates the elaboration of a statistical reliability analysis according to the historical failure data, for the Manlift Traccess 170 people lifting equipment, this in order to determine the current status of said assets and based on the analysis determine improvement actions in maintenance management.

It begins with obtaining all the data corresponding to the asset, referring to the failures reported in the maintenance software, and then the most useful information for the study is sorted, filtered and selected. Then, three statistical distributions (Normal, Weibull 2P and Log Normal) are used to describe the behavior of the faults, determining the appropriate reliability functions for the analysis. Through goodness-of-fit tests (Shi squared and K-S) the model that is most consistent with the real data is selected, being able to predict the behavior of the failures. After obtaining the results by the analysis, the impact and relevance of the same are determined and this information is transferred to a financial analysis that allows to reflect the usefulness of the reliability analysis. Finally, conclusions are obtained from both analyzes carried out.

### KeyWords

*Normal Distribution, Weibull Distribution, Log Normal Distribution Reliability, Availability, Manlift, Goodness of fit, Financial analysis.*

## Introducción

El análisis estadístico de confiabilidad es una herramienta bastante útil en la determinación de potenciales fallas basadas en lo evidenciado en la hoja de vida de un activo. Es una herramienta que por sí sola solo aportaría datos, más no información. Esta herramienta unida con un buen análisis de mantenimiento, filtración de datos útiles registrados en la hoja de vida del activo, determinación de costos y repuestos importantes entre otras variables, permite poder obtener falencias puntuales en un programa de mantenimiento establecido.

Lo que se pretende hacer en este trabajo es una elaboración de un análisis estadístico de confiabilidad para un modelo de *manlift* (equipo de elevación de personal) específico, tomando como referencia y base de datos principal, todo lo registrado en la hoja de vida del equipo, de esta manera se puede entrar a analizar detenidamente los resultados y obtener conclusiones tanto de tipo técnico como de tipo financiero.

La estructura general del documento se dividirá por alcance y cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados, donde se encontrarán tres objetivos específicos que abarcarán el desarrollo del documento. Finalmente se cerrará con las conclusiones del ejercicio realizado.

## **1 Título de la investigación**

Análisis estadístico de confiabilidad para equipos de elevación tipo Manlift (Plataforma de elevación para trabajo en alturas)

## **2 Problema de investigación**

### **2.1 Descripción del problema**

La empresa ECORENTAL SAS, con presencia en la ciudad de Bogotá y Barranquilla brinda servicios de alquiler de maquinaria de elevación para distintos usos de acuerdo a las especificaciones del cliente final. Como parte de su inventario en alquiler, se encuentran las plataformas de trabajo elevable Traccess 170 tipo Manlift, la cual, debido a su multifuncionalidad, especificaciones y preferencia por los clientes, se ha convertido en un equipo crítico para la compañía.

De acuerdo al departamento de mantenimiento se realizan actividades 90 % correctivas y 10 % preventivas al Traccess 170 tipo Manlift, las cuales no están siendo efectivas, ya que, al ser solicitado dicho activo por el departamento comercial, el departamento de mantenimiento responde en muchas ocasiones no tenerla disponible, al no estar en óptimas condiciones de seguridad para su servicio. Por ende, se están ejecutando mantenimientos adicionales no esperados, que ocasionan sobrecostos en: horas extras, horas de paradas adicionales, aumento de mano de obra y lucro cesante por no uso, además, inconvenientes en la calidad del servicio e insatisfacción del cliente final.

### **2.2 Planteamiento del problema**

¿Qué tipo de análisis estadístico de confiabilidad se ajusta al comportamiento de fallas de los Manlift Traccess 170, y como lograr a partir de dicho análisis ejecutar mejores actividades de mantenimiento, mejorando la disponibilidad del equipo?

### **2.3 Sistematización del problema**

¿Qué tipo de análisis estadístico se ajusta a la base de datos obtenida?

¿Qué tipo de datos de las hojas de vida de los activos son los adecuados para ser analizados?

¿Cómo determinar las funciones estadísticas de confiabilidad?

### **3 Objetivos de la investigación**

#### **3.1 Objetivo General**

Elaborar el análisis estadístico de confiabilidad para los Traccess 170 tipo Manlift con los datos de fallas de las hojas de vida de equipo, con ello determinar el estado actual de los activos.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Obtener, organizar y comprender la base de datos de fallas de los Manlift Traccess 170, necesaria para realizar el análisis estadístico.
- Determinar las funciones de confiabilidad (densidad de probabilidad, probabilidad de fallo acumulada, confiabilidad y tasa de fallos), para los Manlift Traccess 170 de acuerdo al registro de fallas y con ello seleccionar el modelo estadístico que mejor se ajuste a los datos observados.
- Realizar un análisis financiero acorde a lo obtenido mediante el análisis estadístico, para determinar las principales causas de falla y los aspectos a mejorar en el proceso.



## 4 Justificación y delimitación

### 4.1 Justificación

A nivel global la gestión del mantenimiento y la implementación de diversas metodologías para llevarlo a cabo, tal como el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM - Reliability Centered Maintenance, por sus siglas en inglés), ha generado amplios conocimientos en el uso de diversas herramientas conceptuales que permitió a los ingenieros de mantenimiento tomar decisiones acertadas, basadas en conceptos aprobados por la ciencia y un constante análisis de las variables a controlar en dicha gestión. Es así como el RCM en su amplio desarrollo, sugiere a los ingenieros el análisis de información adyacente al funcionamiento de activos que se quiere mantener y preservar en óptimas condiciones en el tiempo y garantizar que estos sigan haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan. Dicho análisis de la información al aplicar herramientas estadísticas, ha permitido muchas veces tomar decisiones de gestión que implican reducciones en los costos de mantenimiento y una curva de ciclo de vida más cercana a la teoría, donde los costos sean solamente los necesarios.

El análisis estadístico en su amplia gama de distribuciones como por ejemplo: normal, log Normal, exponencial, weibull, etc., pueden ser útiles para diagnosticar la causa raíz de fallas de diseño, fallas no anticipadas o prematuras (Lien & Nicholls, 2013). Las anomalías en las gráficas de las distribuciones destacan cuando los elementos fallan de manera inusual en comparación con otros componentes o sub componentes. Luego, los ingenieros pueden analizar eventos inusuales que ayudarán a descubrir la causa de estas fallas, cuyas consecuencias podrían ser una mala producción, malas prácticas de mantenimiento, malas condiciones de operación, o aspectos de mal diseño; además de estos factores, se logra comprender el tiempo y la velocidad a

la que fallan los elementos. La comprensión de esta información es clave para evaluar distintos aspectos dentro de la gestión del mantenimiento tales como:

- Modos de falla, efectos y análisis de criticidad
- Análisis de árbol de fallas
- Prueba de crecimiento de confiabilidad
- Mantenimiento centrado en confiabilidad
- Análisis de repuestos

#### **4.2. Delimitación**

La presente investigación se plantea desarrollar desde el mes de diciembre del 2020 hasta el mes de junio del 2021.

La recolección de datos, la obtención de evidencias de los equipos en tiempo real y demás gestión documental relacionada con la investigación se realizará con el permiso de la empresa ECORENTAL SAS, ubicada en la ciudad de Funza, Cundinamarca, Autopista Medellín km 7, Celta Trade Park.

#### **4.3 Limitaciones**

- Desorganización de datos históricos de las máquinas analizadas
- Implementación tardía del software de gestión de mantenimiento en la empresa, lo que impide tener un registro confiable de la vida total de los activos analizados.
- Registros de órdenes de trabajos muy generales, datos censurados no específicos, falta de especificación de fallas reportadas en el software, lo que obliga a revisar manualmente las hojas de vida desde el inicio de la vida del activo hasta la actualidad.

## 5 Marco conceptual

### 5.1 Estado del arte

Palabras clave:

- Gestión de mantenimiento
- Análisis estadístico
- Distribución de Weibull
- Disponibilidad de equipos
- Confiabilidad

#### 5.1.1 Estado del arte Nacional

Se presentan a continuación los artículos nacionales (Colombia) de consulta que se tomaron como referencia para el desarrollo de este documento.

#### **Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial.**

En el 2017 los autores, Maira Gasca, Luis Camargo y Byron Medina en la revista *Información Tecnológica* en su volumen 28 en la publicación “*Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial*” realizan un análisis de confiabilidad para maquinaria usada en la industria de plásticos, donde desarrollaron los siguientes pasos: jerarquización de equipos, catálogo de fallas, análisis estadístico aplicando distribuciones de Weibull, Log Normal, normal y generando conclusiones de la información generada. Se resalta de la publicación el cálculo del Tiempo medio entre fallas (MTBF), Tiempo entre fallas (Time Between Failures, - TBF), Tiempo útil de uso de la maquina (Time Up, UT), tiempo no operativo (Time Down, DT) de los equipos críticos y la significancia de dicha información para el desarrollo del análisis (Gasca et al., 2017)

**Optimización del costo de mantenimiento de sistemas de distribución eléctrica: una aplicación a la función de distribución de Weibull.**

En el 2012 los autores, Leonardo Patarroyo y Oscar Robledo realizan la publicación en la “*Revista Universidad EAFIT*” acerca de las aplicaciones en el sector eléctrico de la distribución de Weibull en la implementación del mantenimiento basado en confiabilidad. El autor concluye que al desarrollar modelos matemáticos que reflejen estadísticamente comportamientos de los componentes de sistemas, es posible estructurar técnica y económicamente los programas de mantenimiento necesarios, lo cual redundará en la calidad en el servicio prestado y en los costos del mantenimiento; se podrá además estimar más certeramente los períodos de reparación y reemplazo de los equipos y componentes de las redes de distribución (Patarroyo & Roberto, 2012).

**El papel de mantenimiento es el de incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades tales como planeación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos.**

De acuerdo al autor Sergio Andrés Pulgarín, en el desarrollo de su Magister en Ingeniería del año 2019 en la Universidad EAFIT Sede Medellín. Propone metodologías estadísticas que logran ser explicadas bajo las concepciones técnicas de fiabilidad y sistemas kantianos para llevar al lector a entender la inclusión del mantenimiento y la producción en un todo y así lograr la aceptación del fuerte vínculo que debe existir entre ellas para llegar a obtener una alta confiabilidad en los procesos productivos. Diferenciando las necesidades de cada área, el conocimiento aportado en este trabajo cumple con las definiciones necesarias y justifica la importancia de obtener indicadores para una buena planeación del mantenimiento y la producción (Sánchez, 2019).

### **5.1.2 Estado del arte internacional**

Se presentan a continuación los artículos internacionales de consulta que se tomaron como referencia para el desarrollo de este documento.

#### **Modelo de regresión de Weibull mixto para el análisis de datos de garantía automotriz.**

En el 2005, los autores Laura Attardia, Maurizio Guidab y Gianpaolo Pulcinic, en la revista “*Reliability Engineering and System Safety - ELSEVIER*” en el volumen 87, realizan el análisis estadístico de dos componentes de las cajas de cambios montados en algunos automóviles de la marca FIAT, base de datos tomada de sus registros de garantías. Se destaca que los autores emplean un modelo de regresión de Weibull mixto aplicando la función de densidad de probabilidad (PDF). En sus resultados, corroboraron que el motivo de falla para el primer componente de una subpoblación débil se debía a defectos del material de fabricación de la pieza y no se veía relacionado por las condiciones de operación del automóvil y de la segunda pieza se determina que su ocurrencia de falla se debe al desgaste consecuencia de la operación de los autos. Finalmente, el modelo seleccionado para ajustarse a los datos observados de ambos componentes se ha probado con éxito mediante la adaptación del procedimiento de prueba de Pearson X2 al contexto de regresión (Attardi et al., 2005).

#### **Visualización de la incertidumbre en las funciones de confiabilidad con aplicación en la revisión de motores aeronáuticos.**

En el año 2010, los autores Mark Ebden, Armin Stranjak y Stephen Roberts en la revista “*Journal of the Royal Statistical Society. Series C: Applied Statistics*” en su volumen 59, realizan un estudio estadístico para estimar la fecha de pérdida de confianza de motores a reacción para el sector aeronáutico, donde se toma una base de datos de 325 motores a reacción

los cuales cuentan con múltiples componentes para el estudio. De este artículo se resalta que los autores basan su estudio en la aplicación de la distribución de Weibull Mixta (MWD) (también conocida como modelo de mezcla de Weibull o distribución de Weibull multimodal).

$$f(t; \theta) = \sum_{j=1}^m P_j p(t|j), \quad p(t|j) = (\beta_j \eta_j)^{-\beta_j - 1} \exp \left\{ - \left( \frac{t}{\eta_j} \right)^{\beta_j} \right\}$$

Así pues, se estima y visualiza la incertidumbre, en particular para la función de peligro. Esto permitió calcular rápidamente el período en el que el riesgo total del motor cae por debajo de un cierto umbral de aceptabilidad con un 95% de confianza (Ebden et al., 2010).

### **Optimización del mantenimiento mediante análisis probabilístico de costes y beneficios.**

En el año 2009, Los autores Devarun Ghosh y Sandip Roy en la revista “*Journal of Loss Prevention in the Process Industries – ELSEVIER*” en el volumen 22, relatan al lector la importancia del modelado basado en costo-beneficio para el establecimiento de un programa de mantenimiento preventivo óptimo basado en confiabilidad. Un plan de mantenimiento óptimo basado en un análisis de este tipo es superior a los modelos existentes de optimización de mantenimiento porque considera simultáneamente el costo relacionado con el Mantenimiento Preventivo y el beneficio financiero que se obtiene del mismo. Se muestra que la metodología se puede utilizar para optimizar el programa de Mantenimiento Preventivo para unidades de proceso cuya función de confiabilidad es exponencial o sigue una distribución de Weibull. Como se demostró, se obtiene un máximo en la relación beneficio-costos (BCR) para la tasa de falla de los equipos tanto constante como linealmente creciente. El intervalo de PM en la BCR máxima es el óptimo (Ghosh & Roy, 2009).

## Nuevo enfoque para determinar los períodos de mantenimiento de los equipos más críticos de la central hidroeléctrica

En el año 2020, los autores Merve BULUT y Evrencan ÖZCAN en la revista “*Reliability Engineering and System Safety - ELSEVIER*” en su volumen 205, determinan los períodos de mantenimiento de una central hidroeléctrica de gran escala en Turquía. Con el fin de obtener el máximo beneficio, se realizan investigaciones para distribuciones de probabilidad apropiadas de datos de fallas y reparaciones de 11 años pertenecientes al grupo de equipos y análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para 16 equipos críticos. Finalmente, se calcularon los períodos de mantenimiento para los equipos utilizando la familia de curvas formada por el coeficiente de costo de los parámetros de distribución de Weibull. En los días de mantenimiento especificados basados en la confiabilidad del sistema y los costos de mantenimiento, se observó que 16 equipos críticos no tuvieron fallas durante el proceso de monitoreo de 1 año, esto indica una mejora del 100% (BULUT & ÖZCAN, 2021).

Se resalta del artículo los procedimientos realizados por los autores, así como el uso de múltiples ecuaciones aplicadas en la gestión del mantenimiento tales como:

*Reliability - Fiabilidad.*

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) \cdot dt \rightarrow R(t) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot dt$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

*Maintainability - Mantenibilidad*

$$M(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) \cdot dt$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] \cdot dt$$

$T =$  *Tiempo de Reparación*

*Availability - Disponibilidad*

$$A(t) = P\{X(t) = 1\}; t > 0$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$X(t) =$  *Estado de un sistema en el tiempo  $t$ ;*

*(Mientras se ejecuta  $X(t) = 1$ )*

*(Mientras falla  $X(t) = 0$ )*

**Predicción del ciclo de vida de las baterías de plomo ácido selladas basadas en un modelo Weibull.**

En el 2018, los autores Yemeserach Mekonnen, Haneen Aburbu y Arif Sarwat para la revista "*Journal of Energy Storage - ELSEVIER*" en su volumen 18, realizan el análisis de rendimiento y el ciclo de vida de baterías de ácido de plomo sellado (SLA). Para ello realizan una distribución de Weibull de tres parámetros (3-parameter), parámetro de forma ( $\beta$ ), el parámetro de escala ( $\alpha$ ) y el parámetro de umbral ( $\lambda$ ). El parámetro  $\beta$  cuando toma valores  $0 < \beta < 1$  expresan una falla prematura,  $\beta = 1$  expresa fallas aleatorias e independiente de la edad del equipo y  $\beta > 1$  indica fallas por desgaste (Mekonnen et al., 2018).



### **Métodos estadísticos para planificar las revisiones de motores diésel en la Guardia Costera de los EE. UU.**

En el año 2004 los autores C. M. Milkie y Dr. A. N. Perakis en la revista “*Naval Engineers Journal*” en su volumen 116, realizaron un análisis estadístico dentro de su RCM, a los motores Diésel de propulsión ALCO 251 de la flota Naval de EE. UU por monitoreo en condición. Dicho análisis empleó una distribución de Weibull de tres parámetros. Como resultado, la Guardia Costera debería considerar refinar la política de revisión de motores diésel para prevenir el aumento de fallas relacionadas con la edad ya que después de determinadas horas de trabajo se evidencia un alza en las fallas (Milkie & Perakis, 2004).

### **Investigación del rendimiento del mantenimiento de una unidad de proceso de gasificación mediante análisis de Weibull.**

En el año 2016 el autor Nur Izyan Zulkafli Reduan Mat Dan, publica en la revista “*Journal of Quality in Maintenance Engineering*” en su volumen 22, redacta su investigación acerca del desempeño de las actividades de mantenimiento realizadas a una línea de gasificación mediante el análisis de Weibull acorde a la base de datos de la línea acerca de los fallos ocurridas en ella para 9 componentes críticos. Como resultados se calcula los valores beta para todos los componentes, indicando que los componentes están en condición de desgaste porque los valores beta son superiores a 1. Los valores de MTTF para todos los componentes se obtienen del gráfico de probabilidad de Weibull. Por ejemplo, el MTTF para la bomba es 1729 horas, lo que significa que la bomba tiene un tiempo de funcionamiento de 1729 horas antes de que ocurra la primera falla y así para el resto de componentes (Zulkafli, 2016). De este artículo resaltar lo práctico que ha mostrado sus resultados y como la interpretación de ellos, ha ayudado a mejorar las condiciones de la línea de gas.

### **Evaluación de fiabilidad de autobuses de transporte de la ciudad en las condiciones reales.**

En el año 2015, Joanna Rymarz, Andrzej Niewczas y Jozef Stoklosa, realizaron la publicación en la revista *“Transport and Telecommunication”* en su volumen 16, acerca del análisis estadístico de la flota de vehículos de transporte de modelo Solaris Urbino 12 y el Mercedes-Benz 628 Conecto L, donde para cada vehículo lo subdividieron en componentes tales como: Motor, Sistema eléctrico, Sistema neumático, Sistema de frenos, Sistema de conducción, Calefacción central y Aire acondicionado y Puertas, y para cada uno de ellos se realizó una distribución de Weibull de dos parámetros realizando la estimación del kilometraje donde cada subsistema pueda fallar (Rymarz et al., 2015).

### **Aplicación de la distribución Weibull para la optimización de las políticas de mantenimiento de un sistema electrónico de señalización ferroviaria.**

En el año 2017 los autores E. Pascale, T. Freneaux, R. Sista, P. Sannino, P. Marmo y L. Bouillaut, realizaron la publicación de su investigación en la revista *“Safety and Reliability - Theory and Applications - Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017”*, donde realizan el análisis estadístico de acuerdo a las fallas de los componentes eléctricos y electrónicos de la señalización de una línea ferroviaria y a partir de los resultados replantar los intervalos de las actividades de mantenimiento para dichos componentes (Pascale et al., 2017). Se destaca del artículo que los autores, al culminar el análisis plantean una mejora en la obtención de los datos para futuros estudios, es decir descartar y agregar nuevas variables de control que posiblemente podrían generar una correlación fuerte para los resultados que se buscan.

### **Análisis de confiabilidad del sistema de enfriamiento del motor diésel.**

En el año 2015 los autores Dhananjay R Dolas y Sudhir Deshmukh publican en la revista “*Universal Journal of Mechanical Engineering*” en su volumen 3, el estudio relacionado a la estimación de la confiabilidad en el sistema de refrigeración de algunos vehículos diésel de una empresa de transporte, para ello realizaron cálculos de confiabilidad, disponibilidad, tiempo medio entre fallas, tasa de fallas y densidad de fallas. Para la estimación de los parámetros de Weibull, el método de mínimos cuadrados (LSM) se utiliza ampliamente en problemas de ingeniería. El método proporciona una relación lineal entre los dos parámetros que tienen como punto de partida los dos logaritmos de la función de distribución acumulativa de Weibull (R Dolas & Deshmukh, 2015).

## **5.2 Marco Teórico**

El sustento teórico de la presente investigación se basa en el desarrollo de los temas:

### **5.2.1 ¿Qué es un Manlift?**

Las plataformas elevadoras móviles de personal (PEMP), conocidas también como manlift o plataforma de Trabajo en altura (PTA), son máquinas que permiten a las personas realizar trabajos en altura, llegando a lugares de difícil acceso para las grúas. Asimismo, permite un trabajo seguro y eficaz, ya que estos equipos son los suficientemente pequeños que pueden desplazarse lateralmente, e incluso puede hacer giros en 360 grados de derecha a izquierda, llegando así a largas distancias fuera del eje de la máquina. Así mismo, por su tamaño pueden ser trasladados sin problemas de un lugar a otro (ANAPAT, 2002) (*Manlift, Plataformas de Elevación Para Trabajos En Altura*, n.d.).

Características del equipo.

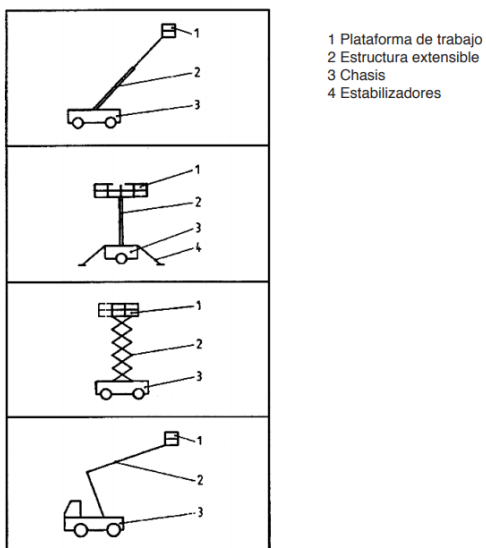


Figura 1 - Componentes de un Manlift

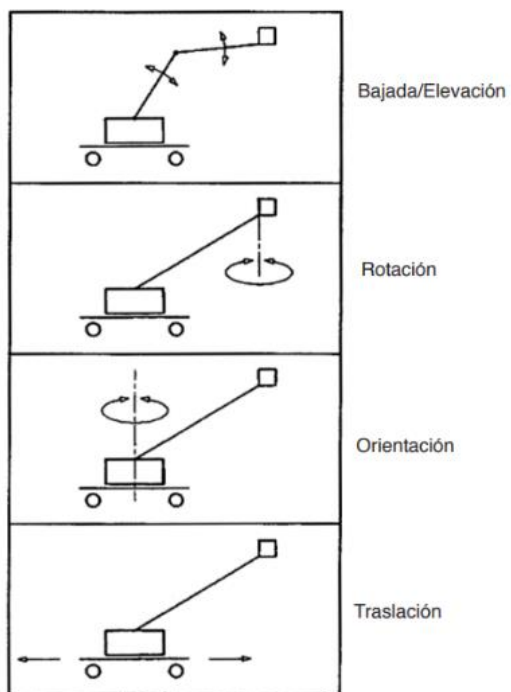


Figura 2 - Grados de libertad de un Manlift

### **5.2.2 Traccess 170, equipo de elevación de personal (Manlift)**

El equipo objeto de la presente investigación es un Manlift, como se describió en la sección anterior. Este cuenta con las siguientes particularidades técnicas que se representan a continuación para que el lector tenga un conocimiento claro de la máquina objeto de estudio (Italy, 2013):

La plataforma de trabajo elevadora TRACCESS 170 está compuesta por un chasis fijado con bulones en el carro de oruga. En el chasis hay ancladas 4 patas estabilizadoras con accionamiento hidráulico que sirven para la estabilización de la máquina. El desplazamiento de los estabilizadores se realiza a través de un distribuidor hidráulico que se acciona manualmente. Sobre el chasis está fijada la torre giratoria montada en un cojinete de la quinta rueda y accionada mediante un motor hidráulico. La torre gira 330°. En la torre está fijado el brazo grupal compuesto por dos brazos articulados accionados por un cilindro hidráulico en el que está fijado en el centro un brazo telescópico formado por 2 elementos (uno fijo y otro extraíble). El cilindro hidráulico permite, además, un movimiento simultáneo de los brazos articulados, a través de bielas. El movimiento del brazo telescópico se efectúa con un cilindro hidráulico. En el brazo telescópico está fijado un brazo articulado (jib) accionado por un cilindro hidráulico. En el brazo articulado (jib) está fijada la plataforma de trabajo. La plataforma de trabajo se mantiene en posición horizontal gracias a un sistema de nivelación por paralelogramo hidráulico. El desplazamiento de la máquina se realiza a través de mandos electrohidráulicos. La central de mando se encuentra en la plataforma de trabajo.

En la torre base está fijado otro puesto de mando que se utiliza en caso de emergencia. La fuente de energía para el desplazamiento de los dispositivos hidráulicos está suministrada por el motor térmico a través de una bomba hidráulica. La batería del vehículo suministra la

alimentación eléctrica a los mandos. La traslación y dirección se hace mediante un mecanismo propulsor de orugas cauchetadas accionadas por reductores, accionados a su vez por motores hidráulicos con freno negativo, que interviene automáticamente y bloquea (frena) el carro de oruga cuando los motores hidráulicos no están alimentados. La dirección se obtiene dosificando adecuadamente de manera diferenciada el flujo de aceite a los motores de traslación mediante una botonera móvil con palancas proporcionales. Alimentado un motor hidráulico en un sentido u otro, se obtiene el radio mínimo radio de giro posible.

La empresa ECORENTAL SAS, posee 4 de estos equipos ubicados en la sede Bogotá en la Autopista Bogotá-Medellín KM 7, Parque Industrial Celta Bodega 20. Desde allí se realizan las actividades de logística prevista para su alquiler tales como transporte, instalación, uso y retorno de acuerdo a las especificaciones del cliente final.

### 5.2.2.1 Dimensiones y datos técnicos

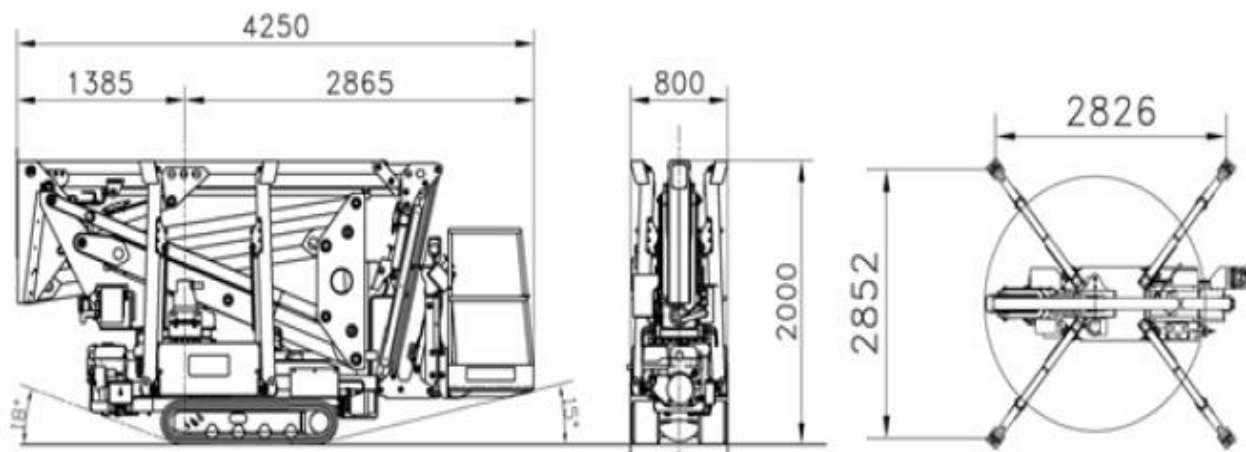


Figura 3 - Dimensiones en mm del Manlift Traccess 170

Capacidad máxima en plataforma	200 kg (2 personas y equipo para 40 kg)
Altura máxima, plano de pisada	15,00 m
Altura máxima de trabajo	17,00 m
Alcance máximo (desde el centro de la rangua a bordo de la plataforma)	7,00 m
Alcance máximo de trabajo	7,50 m
Máxima inclinación admitida del terreno	3°
Máxima inclinación admitida del chasis	0°
Velocidad máxima del viento admitida	12,5 m/s
Rotación de la torre	330°
Nivelación plataforma de trabajo	Paralelogramo hidráulico
Dimensiones de la plataforma de trabajo	1300 x 700 x 1100 mm
Fuerza manual lateral máxima admitida	40 daN
Tensión de la instalación eléctrica	12 V
Mandos	Electrohidráulicos
Capacidad tanque aceite hidráulico	32 L
Presión máxima de ejercicio	190 bar
Peso total	2,05 t
Máxima reacción al suelo del estabilizador	1700 daN
Distancia entre ejes de estabilización de los pernos platillo (mín)	2826 mm
Distancia entre ejes de estabilización de los pernos platillo (max)	2852 mm
Distancia entre ejes de los estabilizadores	2826 mm

*Tabla 1 - Ficha técnica de Traccess 170, (Italy, 2013)*

### 5.2.2.2 Área de trabajo

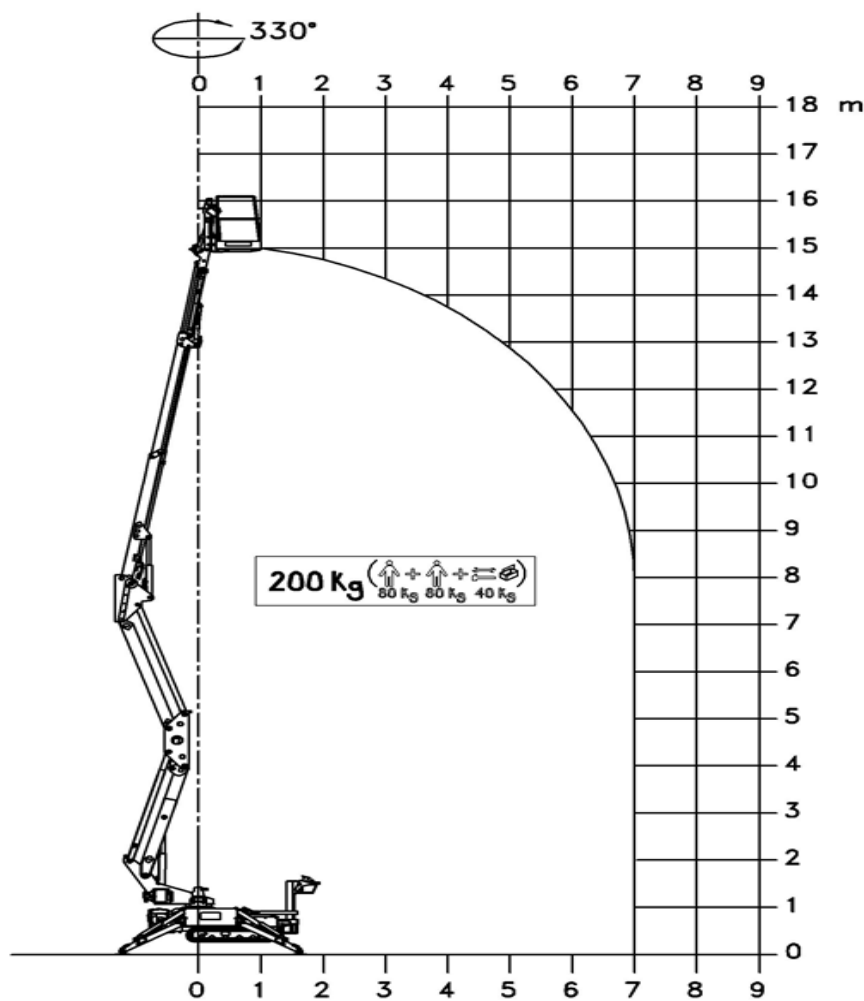


Figura 4 – Área de trabajo del Manlift Traccess 170

### 5.2.2.3 Límites ambientales

Es posible usar la máquina en las siguientes condiciones ambientales:

- Temperatura ambiente comprendida entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $+40^{\circ}\text{C}$ ;
- Humedad del 80% a  $40^{\circ}\text{C}$ ;
- Velocidad del viento inferior a  $12,5\text{ m/s}$  ( $45\text{ km/h}$ )-6° de la escala Beaufort de los

vientos.



Está prohibido utilizar la máquina en las siguientes condiciones ambientales:

- Condiciones atmosféricas desfavorables y escasa visibilidad (lluvia, nieve, niebla, etc.)
- Presencia de atmósfera explosiva
- Ambientes internos con insuficiente ventilación
- Escasa o insuficiente iluminación; (la iluminación tiene que ser suficiente para cubrir toda la zona de trabajo y permitir la lectura de los adhesivos que se encuentran a bordo de la máquina y la localización de todos los mandos y dispositivos de emergencia).

#### 5.2.2.7 Elementos Principales

- |                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Estabilizador anterior         | 12. Cuadro general              |
| 2. Estabilizador posterior        | 13. Mandos de emergencia desde  |
| 3. Placa de soporte               | el suelo                        |
| 4. Torre                          | 14. Mandos de los               |
| 5. Brazo articulado de            | estabilizadores                 |
| pantógrafo                        | 15. Cuadro de mandos en         |
| 6. Brazo base telescópico         | plataforma                      |
| 7. Extensión telescópica          | 16. Bastidor del motor de       |
| 8. Cuadro de mando móvil de la    | combustión interna              |
| traslación y dirección            | 17. Motor de combustión interna |
| 9. Plataforma de trabajo          | 18. Cilindro de elevación del   |
| 10. Depósito de aceite hidráulico | pantógrafo                      |
| 11. Motor de rotación de la torre |                                 |

- |  |   |
|--|---|
| 19. Cilindro de elevación del brazo telescópico  | 24. Grupo electrohidráulico de tracción   |
| 20. Cilindro de extracción del brazo telescópico | 25. Jib                                   |
| 21. Cilindro de nivelación de la cesta           | 26. Cuadro de desconexión de las baterías |
| 22. Cilindro de elevación de la antena (jib)     | 27. Cuadro de mandos en tierra            |
| 23. Soporte del brazo                            | 28. Carro de oruga                        |

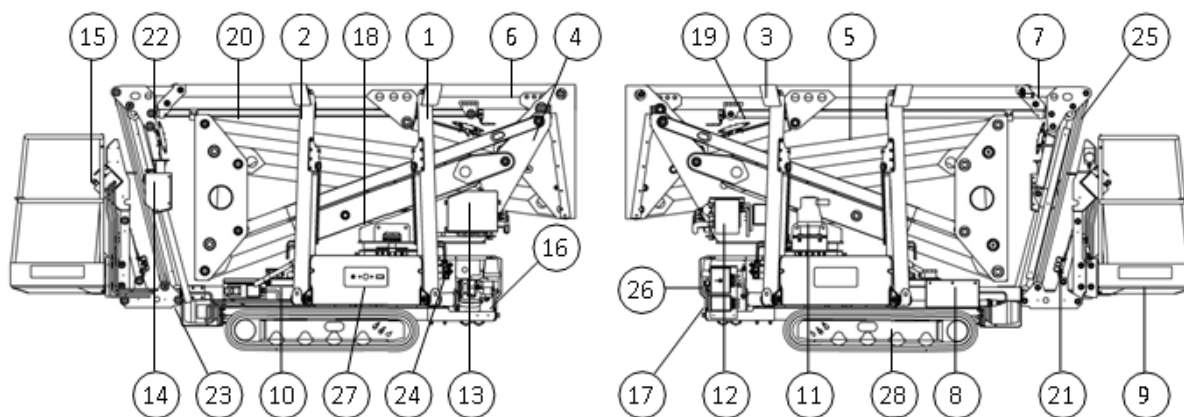


Figura 5 – Localización partes del Manlift Tracess 170

### 5.2.2.8 Botones de parada de emergencia

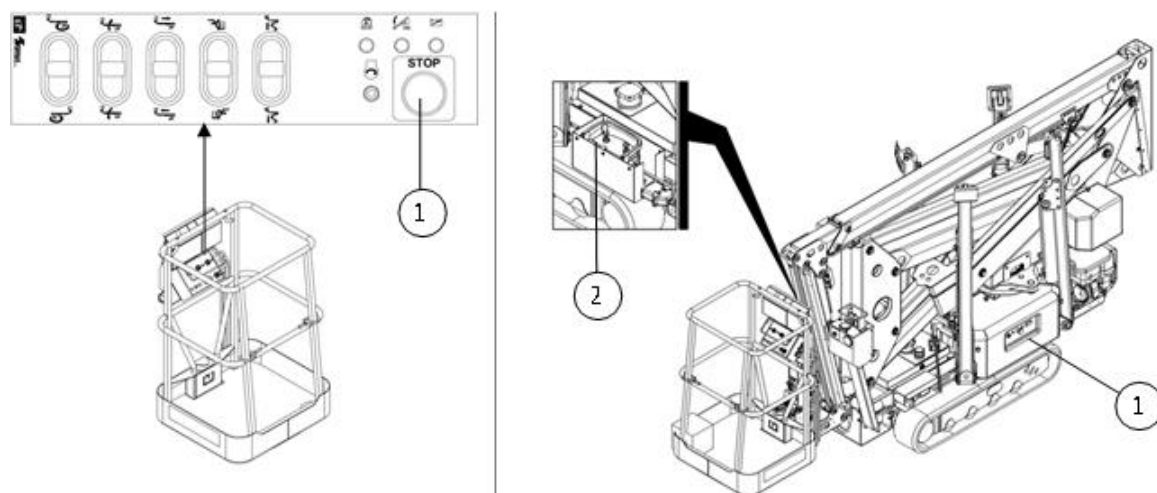


Figura 6 – Localización de paradas de emergencia del Manlift Tracess 170

Botón rojo en forma de hongo con fondo amarillo posicionado uno en (pos. 1 fig. 2.10.1) en el cuadro de mandos en la plataforma y el otro (pos. 1 fig. 2.10.2) en el cuadro de mandos en el suelo y el otro (pos. 2 fig. 2.10.2) en la botonera de tracción. Pulsando uno de los tres botones se desactivan todas las maniobras de la plataforma de trabajo elevable y el motor del vehículo se apaga. Para volver a activar máquina, girar el botón en sentido horario.

### 5.2.2.25 Funciones primarias y secundarias

#### *Funciones primarias*

La plataforma de trabajo elevable se utiliza para llevar a cabo desde el interior de la plataforma de trabajo, tareas tales como:

- Trabajos de blanqueamiento y mantenimiento ordinario y extraordinario de edificios.
- Mantenimiento de instalaciones y establecimientos industriales.
- Trabajos de mantenimientos de líneas eléctricas e instalación de sistemas eléctricos.

- Instalación en alturas de vallas publicitarias.
- Trabajos de poda.

### ***Funciones secundarias***

La plataforma de trabajo para cumplir sus requerimientos principales por los cuales fue fabricado y adquirido cumple ciertas funciones que sin ellas sería imposible desarrollar sus actividades principales, se enumeran algunas de ellas:

- Bloqueo estructural, para evitar desplazamientos y volcamientos.
- Control total de los ángulos y alturas especificadas para el equipo de acuerdo a las necesidades del trabajo.
- La plataforma cuenta con adaptaciones lumínicas y reflectivas que hacen visible el equipo durante su fase de transporte y trabajo.
- Disposición de horómetros para control de tareas de mantenimiento.
- Fácil uso y confort del operador.

### **5.2.3 ¿Qué es la Ingeniería de Confiabilidad?**

La ingeniería de confiabilidad cubre todos aquellos procesos de concepción, diseño, pruebas, estimación, optimización, mantenibilidad y disponibilidad de un producto. La confiabilidad de los productos se puede mejorar aplicando técnicas de análisis de datos de vida y otras metodologías de ingeniería de confiabilidad (Yong, 2004).

Para tener más conocimientos sobre la estimación y el análisis del producto, las teorías y aplicaciones del análisis de confiabilidad, no solo se desarrollan sobre la base de la experiencia de los ingenieros, sino que también se basan en el conocimiento y las herramientas de las matemáticas y la estadística. Desde un punto de vista estadístico, la confiabilidad se expresa como la probabilidad de que un producto o servicio realice las funciones requeridas durante un

período de tiempo específico, es decir, la vida útil del diseño, bajo las condiciones de operación especificadas, tales como temperatura o humedad, sin fallas.(Yong, 2004)

Una de las partes más importantes de la ingeniería de confiabilidad es el modelado de confiabilidad para el análisis de datos de vida, que se ocupa de los problemas específicos para estudiar y predecir la vida útil de los productos utilizando distribuciones paramétricas estadísticas o métodos no paramétricos, y posteriormente estas metodologías y resultados se pueden aplicar a prueba y predicción de productos, optimización de la política de garantía y mejora de la calidad y confiabilidad.(Yong, 2004)

#### ***5.2.4 ¿Qué es el Análisis Estadístico?***

El análisis estadístico es la recopilación e interpretación de datos con el fin de descubrir patrones y tendencias. Es un componente del análisis de datos. El análisis estadístico puede ser utilizado en situaciones como la recopilación de interpretaciones de investigación, el modelado estadístico o el diseño de encuestas y estudios. También puede ser útil para las organizaciones de inteligencia empresarial que tienen que trabajar con grandes volúmenes de datos.

En el contexto de la inteligencia empresarial (BI), el análisis estadístico implica recopilar y examinar cada muestra de datos en un conjunto de elementos de los que se pueden extraer muestras. Una muestra, en estadística, es una selección representativa extraída de una población total (*What Is Statistical Analysis?*, n.d.).

El objetivo del análisis estadístico es identificar tendencias. Un negocio minorista, por ejemplo, podría utilizar el análisis estadístico para encontrar patrones en datos de clientes no estructurados y semiestructurados que se pueden usar para crear una experiencia de cliente más positiva y aumentar las ventas.

### *Pasos del análisis estadístico*

El análisis estadístico se puede desglosar en cinco pasos discretos, como se indica a continuación:

- Describir la naturaleza de los datos que se van a analizar.
- Explorar la relación de los datos con la población subyacente.
- Crear un modelo para resumir la comprensión de cómo se relacionan los datos con la población subyacente.
- Probar (o refutar) la validez del modelo.
- Utilizar análisis predictivos para ejecutar escenarios que ayuden a guiar acciones futuras.

El análisis estadístico se puede subdividir en dos partes estadísticas descriptivas y estadísticas inferenciales. En las estadísticas descriptivas, se resumen y representan gráficamente los datos de una muestra o de toda una población. En las estadísticas inferenciales, uno no sólo recopila datos numéricos como muestra de una población, sino que también los analiza y, sobre la base de este análisis, saca conclusiones con incertidumbres estimadas (es decir, mediante el uso de la teoría de probabilidad) sobre la población.

#### ***5.2.5 ¿Qué son las Distribuciones continuas de probabilidad aplicadas a la confiabilidad?***

En las variables aleatorias continuas, la contraparte de la función de probabilidad es la función de densidad de probabilidad, que se denota  $f(x)$ . La función de densidad de probabilidad no da probabilidades directamente. Si no que el área bajo la curva de  $f(x)$  que corresponde a un intervalo determinado proporciona la probabilidad de que la variable aleatoria tome uno de los valores de ese intervalo. De manera que cuando se calculan probabilidades de variables

aleatorias continuas se calcula la probabilidad de que la variable aleatoria tome alguno de los valores dentro de un intervalo (Anderson et al., 2001).

Existen diversas distribuciones que ayudan a describir acontecimientos y comportamientos de los datos; en ingeniería de confiabilidad las más usadas son:

- Distribución Normal
- Distribución Log Normal
- Distribución Exponencial
- Distribución Weibull

Para cada distribución se pueden determinar ciertas funciones estadísticas que logran determinar el comportamiento de las fallas y por ende la confiabilidad del activo, estas funciones son:

- Función de densidad de probabilidad (PDF)  $f(t)$
- Función de probabilidad de fallo acumulada  $F(t)$
- Función de Confiabilidad o tasa de supervivencia  $R(t)$
- Función tasa de fallos, o tasa de fallo local  $h(t)$ .

En la tabla 2 se presentan las ecuaciones asociadas a cada función de confiabilidad para las distribuciones mencionada

### ***5.2.6 ¿Qué es la distribución de Weibull?***

En la teoría de probabilidad y estadística, la distribución de Weibull es una de las distribuciones de probabilidad continua más importantes. Fue, introducido por primera vez por Waloddi Weibull en 1939 cuando estaba estudiando la cuestión de la fuerza estructural y el análisis de datos de vida, y fue nombrado formalmente en su honor más tarde en 1951. Propuso el modelo "cadena" para explicar la resistencia estructural. Basándonos en la suposición de que

una estructura se compone de varios componentes pequeños ( $n$  piezas) en serie, podríamos considerar la estructura como compuesta de una cadena de  $n$  anillos, la fuerza de la cual (o la vida) depende completamente de la fuerza (o vida) del anillo más débil. En su modelo, con la suposición de que la fuerza de los diferentes anillos es independiente y los anillos idénticamente distribuidos, encontrar la distribución de la fuerza de la cadena se convierte en el problema de encontrar la distribución del anillo más débil (History Of Weibull Distribution, n.d.).

La ingeniería de confiabilidad utiliza estadísticas para planificar el mantenimiento, determinar el costo del ciclo de vida, pronosticar errores y determinar los períodos de garantía de los productos. Este es un tema común discutido en todos los campos de la ingeniería y a menudo visto en la electrónica de potencia, donde las fallas del subsistema pueden llegar a causar daños importantes al sistema en general, o peor aún, afectaciones al personal involucrado.

Las gráficas de Weibull registran el porcentaje de productos que han fallado durante un período de tiempo arbitrario que se puede medir en arranques de ciclo, horas de tiempo de ejecución, millas conducidas, etc. La escala de tiempo debe basarse en las condiciones lógicas del producto (How the Weibull Distribution Is Used in Reliability Engineering - Technical Articles, n.d.).

Weibull es extremadamente útil para la planificación del mantenimiento, particularmente el mantenimiento centrado en la confiabilidad. Beta, ( $\beta$ ) le dice al analista si se necesitan o no inspecciones y revisiones programadas. Si  $\beta$  es menor o igual a uno, las revisiones no son rentables. Con  $\beta$  mayor que uno, el período de revisión o el intervalo de inspección programado se lee directamente de la *tabla 2* con una probabilidad aceptable de falla. Para los modos de falla por desgaste, si el costo de una falla no planificada es mucho mayor que el costo de un



reemplazo planificado, existe un intervalo de reemplazo óptimo por un costo mínimo. Con el pronóstico de fallas de Weibull, se realizan intercambios cuantitativos entre:

- Mantenimiento programado y no programado,
- Modernización forzada y modernización de conveniencia,
- Inspecciones no destructivas versus reemplazo de piezas,
- Acción correctiva versus "no hacer nada"
- Diferentes tiempos entre revisiones, intervalos.
- Intervalos de sustitución óptimos.

El mantenimiento planificado induce cambios cíclicos o rítmicos en las tasas de falla. El ritmo se ve afectado por las interacciones entre las vidas características de los modos de falla del sistema, los períodos de inspección y los reemplazos de piezas.

<b>Distribución</b>	<b><math>f(t)</math></b>	<b><math>F(t)</math></b>	<b><math>R(t)</math></b>	<b><math>h(t)</math></b>	<b><math>MTBF</math></b>
Normal	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\left(\frac{t-\mu}{2\sigma^2}\right)} dt$	$R(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$MTBF = \mu$
Weibull	$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	$MTBF = \eta\Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right]$
Log. Normal	$f(t) = \frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt$	$R(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$MTBF = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$
Exponencial	$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t)}$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t)}$	$R(t) = e^{-\lambda(t)}$	$h(t) = \lambda$	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$

Tabla 2 - Funciones de probabilidad de acuerdo a la distribución empleada

### 5.2.7 *¿Qué es la Aproximación de Rangos medios?*

El rango medio es el enfoque más popular para estimar las posiciones de trazado del eje Y. Los rangos medios se consideran los más precisos y, por lo tanto, la mejor práctica para estimaciones de Weibull. Existen distintos tipos de aproximaciones de Rangos medios, por ejemplo, la aproximación de Benard tiene la suficientemente precisión de 1 % para datos  $N = 5$  y 0,1 % para datos  $N = 50$ ), la aproximación de Hazen y Mean Rank Plotting Position también son usadas, para el estudio de caso se aplica Bernard. (Abernethy, n.d.) La regresión de rango medio determina la línea recta de mejor ajuste mediante el ajuste de la curva de regresión de mínimos cuadrados, en lugar de hacerlo a simple vista. Este es el método más popular y generalmente es el método predeterminado por software de Weibull.

### 5.2.8 *¿Qué Son Los Mínimos Cuadrados?*

Es un procedimiento de análisis numérico en el cual, dado un conjunto de datos (pares ordenados y familia de funciones), se intenta determinar la función continua que mejor se aproxime a los datos (línea de regresión o la línea de mejor ajuste), proporcionando una demostración visual de la relación entre los puntos de los mismos. En su forma más simple, busca minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas (llamadas residuos) entre los puntos generados por la función y los correspondientes datos. (*▷El Método de Mínimos*

*Cuadrados: Definición y Ejemplos* [☑](#) - MiProfe.Com, n.d.)g

### 5.2.9 *¿Qué son las Pruebas de bondad de ajuste?*

El problema de determinar si una muestra pertenece a una distribución teórica hipotética se resuelve empleando pruebas de bondad de ajuste, que estime la adecuación de los datos determinando la diferencia entre la frecuencia de ocurrencia de un evento. Caracterizado por una muestra observada y las frecuencias esperadas obtenidas de la distribución hipotetizada

(Modarres et al., 2017). Para ello se utilizan las denominadas pruebas de bondad de ajuste. Los procedimientos empleados a menudo en ingeniería de confiabilidad como pruebas de bondad de ajuste son (Yong, 2004):

- Prueba de chi-cuadrado
- Prueba de Kolmogorov-Smirnov
- Prueba de Anderson-Darling
- Prueba de Cramer-von Mises
- Prueba de Hollander-Proschan
- Prueba de Mann-Scheuer-Fertig
- Prueba de Tiku

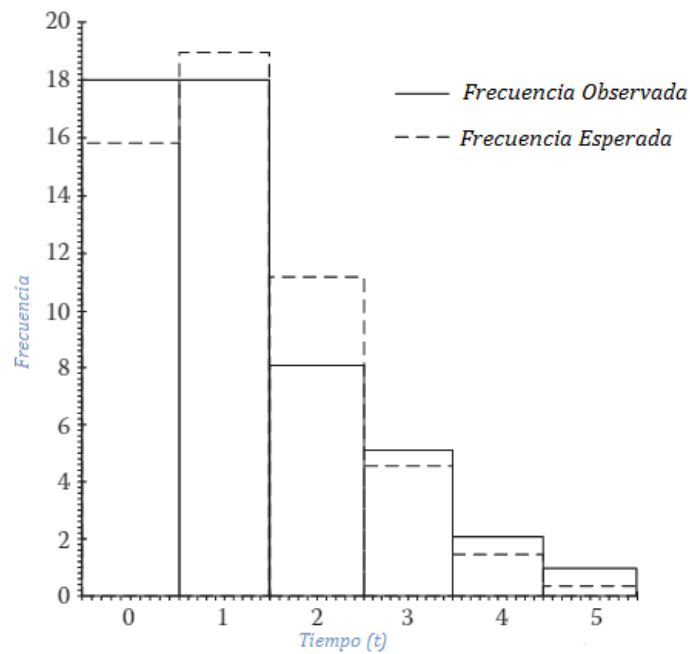


Figura 7 -Gráfico de frecuencia observada vs esperada en las pruebas de bondad de ajuste

### 5.3 Marco normativo y legal

Esta máquina al ser de elevación de personal está enmarcada en toda la normativa de trabajo en alturas que a su vez hace parte de la normativa de seguridad y salud en el trabajo.

Se han dispuesto de manera cronológica todas las normas referentes a la operación de este tipo de máquinas, y a su vez de todo el marco normativo que hace posible que se puedan alquilar y vender este tipo de equipos (Salud, 2021):

- ***Ley 9 de 1979: Código sanitario Artículo 122 a 124***

Establece las normas generales para preservar y mejorar todas las condiciones sanitarias referentes a la salud humana

- ***Resolución 2400 de 1979***

Establece todo el marco relativo a la seguridad, higiene y vivienda en los lugares de trabajo, indispensable para poder entender como los trabajadores deben disponerse en sus establecimientos de trabajo

- ***Resolución 3673 de 2008***

En esta resolución sale a la luz un reglamento técnico formal para el trabajo en alturas, este como tal es el primer paso reglamentado sobre trabajo en alturas, donde a partir de este se pueden generar procedimientos formales, certificaciones y demás.

- ***Resolución 736 de 2009***

Modificación de contenido y calidad a la resolución 3673 de 2008, la base técnica sigue siendo la misma

- ***Circular 70 de 2009***

Complemento a la resolución 736 de 2009, donde se aclaran ciertos requisitos que se tienen que cumplir hacia los procedimientos e instructivos relativos a todo el trabajo en alturas.

- ***Resolución 2291 de 2010***

Modificación a la resolución 736, donde alarga los plazos de cumplimiento que tienen que cumplir las empresas para poder adoptar estos reglamentos técnicos.

- ***Resolución 1409 de 2012***

Es el primer reglamento de seguridad en trabajos en alturas referente a los cuidados y protección frente a caídas.

- ***Resolución 2578 de 2012***

Primer reglamento expedido por el SENA donde se involucra el tema formativo en trabajos en alturas, los requisitos que deben cumplir los establecimientos y empresas que quieran brindar esta formación y los lineamientos generales para el aprendizaje y enseñanza del mismo.

- ***Resolución 1903 de 2013***

Modificación de la resolución 1409 donde se establece con mayor claridad criterios para certificación de centros de formación, y un enfoque de seguridad más concreto hacia los aprendices con problemas de accesibilidad.

- ***Resolución 3368 de 2014***

Modificación de la resolución 1409 sobre el perfil laboral y personal que deben tener tanto el coordinador como el entrenador de trabajo en alturas.

- ***Resolución 1178 de 2017***

Establece ciertos requisitos de seguridad y de técnica que deben cumplir los centros de entrenamientos y empresas dedicadas al sector de protección de caídas y trabajo en alturas.

- ***Circular 035 de 2020***

Ampliación de la vigencia del certificado para trabajo en alturas de 30 días, esto relativo a la superación en progreso de la emergencia sanitaria por el COVID-19 declarada por el ministerio de Salud y Protección Social.

## 6. Diseño de la metodología y cronograma

### 6.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación en proyectos puede enmarcarse dentro de los siguientes escenarios (Hernandez Sampiere et al., 1991):

- Histórica: Donde se analizan eventos del pasado y buscan involucrarlos con eventos del presente
- Documental: Donde se analiza información ya registrada sobre el tema que es objeto de estudio
- Descriptiva: Como su nombre lo indica es el tipo de investigación el cual describe todos los atributos de la población a estudiar.
- Correlacional: Mide la relación entre variables de la población a estudiar
- Explicativa: Justifica la causa de un fenómeno, analiza específicamente unidades de la población estudiada.
- Estudios de caso: Registra información del objeto de estudio, donde además los compara con datos obtenidos en diferentes momentos de una misma población con el objetivo de evaluar algún cambio.
- Experimental: Donde se analiza el efecto que se produce por la acción o control de una o más variables que dependen de otras.

El presente documento se enmarcaría en el tipo de investigación de *Estudio de caso de corte cuantitativo*, ya que la información registrada y el desarrollo del trabajo se obtiene de manera numérica, se trabaja con horómetros de equipos, con costos, y el mismo desarrollo del análisis se realiza de manera estadística por lo cual todo está enmarcado en la parte cuantitativa. Se pretende realizar un análisis basado en datos de registro reales tomados de máquinas que



operan, estos datos además se revisarán y analizarán cumpliendo los objetivos propuestos inicialmente.

### **6.1.1. Fuentes de obtención de información**

Para poder recopilar la información necesaria y poder realizar el tipo de investigación de un estudio de caso es necesario tener unas fuentes establecidas, donde podamos obtener esta información. Al hablar de análisis de confiabilidad, datos de fallas, horas trabajadas en los mantenimientos y demás datos propios de la operación y mantenibilidad de la máquina necesitamos de manera obligada la hoja de vida de los equipos, el contexto operacional donde opera, manuales entre otros. Como las fuentes son diversas estas mismas cobran su importancia al clasificarse como primarias o secundarias para la presente investigación.

#### **6.1.1.1 Fuentes primarias**

Como fuente primaria se establece el programa de administración de mantenimiento *SAMM*, un software de mantenimiento CMMS que guarda toda su información en línea por medio de la nube. En este software se puede registrar todo tipo de datos, los *seriales de todos los equipos* de la empresa, las *ordenes de trabajo* cargadas a cada equipo, *los técnicos* que se encuentran laborando en la empresa, los técnicos que tienen asignadas ordenes de trabajo, repuestos, *programas de mantenimiento y frecuencias*, cargar *costos*, ya sea hora personal como costo de repuestos e infinidad de datos de suma utilidad no solo para el departamento técnico sino para los demás departamentos de la empresa que hacen uso de él.

Figura 8 - Software de gestión de mantenimiento (SAMM web)

Toda la información de las hojas de vida de los activos empleados en la presente investigación, son consultados de este software, por lo cual se establece como única fuente primaria.

#### 6.1.1.2 Fuentes secundarias

Como fuentes secundarias se establecen los manuales de operación, de partes y de mantenimiento propios de la máquina. También como se expresó en el marco teórico y en el estado del arte se consultaron bastantes artículos relacionados con el presente desarrollo estadístico, del cual se tomaron formulas y conceptos importantes para la investigación.

#### 6.1.3 Metodología de la investigación

La metodología a usar en este análisis de confiabilidad, empezará por una recolección de información detallada respecto a los equipos a estudiar. Se realizará esta recolección con los

datos de los equipos de la empresa ECORENTAL SAS, lugar de trabajo de uno de los autores, se tomarán como elementos principales de estudio: hojas de vida de los equipos, manuales técnicos de servicio, operación y de partes, históricos de órdenes de trabajo ejecutadas por el personal técnico hacia los equipos, reportes de gestión de mantenimiento provistos por el software de mantenimiento manejado en la empresa entre otros datos que se consideren relevantes para el análisis.

Tomando todos los datos posibles de los equipos en cuestión y registros históricos de por lo menos dos años atrás hacia el presente es posible empezar a implementar elementos estadísticos que permitan transformar estos datos en información útil que a su vez formen las bases del presente estudio.

Por lo tanto, se escogerán cuatro equipos, todos son el mismo modelo, pero todos varían en horómetro de uso, por lo cual es una muestra perfecta para la investigación.

Esta metodología se dividirá en 4 fases:

**FASE 1:** Determinación de criticidad de equipos

Nombre clave: Criticidad

Actividades asociadas:

1. Revisión de movimiento de equipos de alquiler de acuerdo a software de mantenimiento.
2. Revisión de rotación y solicitudes hechas de repuestos para cada equipo de elevación de este modelo.
3. Análisis de información de mantenibilidad y movimiento de equipos para determinar los modelos más críticos de la empresa.

**FASE 2:** Recopilación y clasificación de información histórica de las máquinas

Nombre clave: Recopilación y clasificación

Actividades asociadas:

1. Búsqueda y localización de hojas de vida, manuales de servicio, catálogo de averías y demás documentos técnicos de los equipos determinados como más críticos para la empresa
2. Revisión exhaustiva de los históricos obtenidos en el punto 1 para registrar ítems más importantes entre los cuales se definen:
  - Fallas repetitivas
  - Repuestos cambiados
  - Horas de trabajo invertidas en los mantenimientos
  - Frecuencia de mantenimiento
  - Repetición de trabajos por el mismo técnico
  - Horómetros registrados de cada trabajo
  - Asociación de repuestos cambiados con cada orden de trabajo

**FASE 3:** Generación de modelo estadístico de confiabilidad del equipoNombre clave: Modelo estadísticoActividades asociadas:

1. Clasificación de la información registrada en el ítem 2 de la fase 2 de acuerdo a la relevancia de la misma para la construcción inicial del modelo.
2. Construcción de un borrador inicial del modelo determinando las variables principales para el reemplazo en las distribuciones.
3. Ajuste del modelo de acuerdo a datos arrojados y contraste con la información real y registrada teniendo en cuenta lo obtenido por el software de mantenimiento.
4. Reajuste del modelo de acuerdo a variables registradas y determinación de datos arrojados por las ecuaciones para generar el modelo estadístico de confiabilidad final.

**FASE 4:** Análisis del modelo para determinar tiempo medio entre fallas (MTBF) en el equipo y determinar el tipo de análisis correcto ajustable al equipo para desarrollar análisis financiero.

Nombre clave: AnálisisActividades asociadas:

1. Revisión del modelo para determinar las variables ajustables de acuerdo a la mantenibilidad asociada a cada equipo

2. Contrastar los datos obtenidos del modelo versus los registros históricos de las máquinas y determinar la desviación de los datos obtenidos en cuanto a mantenibilidad.
3. Ajuste de resultados obtenidos por modelo estadístico, determinación de MTBF, determinación de resultados relevantes y realización de análisis financiero de acuerdo a comparativo entre lo brindado por el modelo estadístico, manuales de servicio y registros históricos de las máquinas.

AÑO		2021												
Tareas	Meses	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13
<b>FASE 1</b>														
1.1. Revisión de movimiento de equipos de alquiler de acuerdo a software de mantenimiento														
1.2. Revisión de rotación y solicitudes hechas de repuestos para cada equipo de elevación de este modelo														
1.3. Análisis de información de mantenibilidad y movimiento de equipos para determinar los modelos más críticos de la empresa														
<b>FASE 2</b>														
2.1. Búsqueda y localización de hojas de vida, manuales de servicio, catálogo de averías y demás documentos técnicos de los equipos determinados como más críticos para la empresa														
2.2. Revisión exhaustiva de los históricos obtenidos en el punto 1 para registrar ítems más importantes de mantenibilidad														
<b>FASE 3</b>														
3.1. Clasificación de la información registrada en el ítem 2 de la fase 2 de acuerdo a la relevancia de la misma para la construcción inicial del modelo														
3.2. Construcción de un borrador inicial del modelo determinando las variables principales para el reemplazo en las ecuaciones de Weibull														
3.3. Ajuste del modelo de acuerdo a datos arrojados y contraste con la información real y registrada teniendo en cuenta lo obtenido por el software de mantenimiento														
3.4. Reajuste del modelo de acuerdo a variables registradas y determinación de datos arrojados por las ecuaciones para generar el modelo estadístico de confiabilidad final														
<b>FASE 4</b>														
4.1. Revisión del modelo para determinar las variables ajustables de acuerdo a la mantenibilidad asociada a cada equipo														
4.2. Contrastar los datos obtenidos del modelo versus los registros históricos de las máquinas y determinar la desviación de los datos obtenidos en cuanto a mantenibilidad.														
4.3. Ajuste de frecuencias de mantenimiento y determinación de MTBF de acuerdo a comparativo entre lo brindado por el modelo estadístico, manuales de servicio y registros históricos de las máquinas														

Figura 9 - Cronograma de Fases

#### 6.1.4. Recopilación de la información

Como se mencionó en el apartado de las fuentes primarias y secundarias, la información más importante para el desarrollo de la presente investigación recae principalmente en la obtención de la hoja de vida de los activos. Para ello hay que dirigirse al software con el número del serial del equipo, se ingresa y se puede obtener por tanto la información de la hoja de vida:

The screenshot shows the SAMM web software interface. At the top, there's a navigation bar with tabs like MIS ACCESOS, CONFIGURACION, MAESTROS, SERVICIO, COMERCIAL, INVENTARIO, COMPRAS, ALQUILER, and Ayuda. Below this is a table of equipment records. The selected record is for equipment with Serial 'ECOTRACCESS17001' and Code '11089'. The details panel on the right shows various fields: Telefono (7452407-08-09-10-11), Garantía, F. Marcha (30/01/2017 09:00), Venc certificación (24/10/2020), Fecha de Venta (30/01/2017), Horometro (3369.0), Ultima Lectura (18/12/2020 08:00), H. Garantía (0.0), Prom Horas (1.0), Estado EO (Activo), Costo (0.0), F. Importación (30/01/2017), and Observaciones (CREADO EL 30/01/2017).

Figura 10 - Datos del equipo en pantalla principal del software

Este tiene unos comandos en pantalla que permiten obtener la hoja de vida, dando como resultado un archivo en Excel con toda la información pertinente, para posteriormente poder filtrar y usar la información en el análisis:

Serial:		ECOTRACCESS17004							
Cliente:		RENT INDUSTRIAL SAS							
Contacto:		IVON HERRERA							
Ult. Servicio:				Horómetro: 1984					
Ciudad:		BOGOTA		Ult. Lectura: 11/03/2021					
SERVICIOS PRESTADOS									
OT	Fecha	Trabajos	Tecnico	Estado	Ciclo	Horometro	Duración	Valor M.O.	
OTT-1443	02/02/2018	Se realiza alistamiento, se completa nivel de combustible y se colocan adhesivos, se hacen pruebas de funcionamiento	Jhon Jairo Quintana Gonzalez	Cerrada			5	\$ 34.694	
OTE-5425	06/02/2018	el equipo se encuentra operativo, se retorqu coastillos de valvula del boom principal.	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	Cerrada	1	18	1	\$ 13.239	
OTE-5660	09/05/2018	Entrega de control de mando en buenas condiciones probado a satisfacción del cliente.	Edgard Giovanni Gutierrez	Cerrada			3	\$ 35.220	
OTE-5746	14/06/2018	Funcionamiento ok pero canasta reclinada al brazo osea desnivelado y presenta golpe en baranda y platina de	Edgard Giovanni Gutierrez	Cerrada	1	368	4	\$ 41.090	
OTT-1749	04/08/2018	Se endereso protector frontal de los mandos de la canasta. Se le revisa nivel de aceite de motor.	Victor Andres Gutierrez	Cerrada			7	\$ 68.012	
OTE-6065	08/11/2018	El equipo se encuentra operativo.	Javier Mardoqueo Bernal	Cerrada	1	679	1	\$ 13.239	

Figura 11 - Hoja de vida del equipo

La hoja de vida del equipo arranca con trabajos realizados desde el inicio de la adquisición de la máquina hasta el último trabajo reportado.

En la figura 11 se encuentran las siguientes columnas a destacar:

- OT: Orden de trabajo, creada por el programador de mantenimiento y aprobada por el coordinador de mantenimiento, esta orden se programa a un técnico y comprende distintos tipos de trabajos:
  - OTS: Orden de trabajo de servicio, orden de trabajo que se programa cuando un equipo se devuelve a la bodega principal, orden de trabajo principalmente de inspección
  - OTT: Orden de trabajo de taller, orden de trabajo que se programa para el alistamiento de un equipo para despachar.
  - OTE: Orden de trabajo externa, orden de trabajo que se programa para atender un mantenimiento o una emergencia de un equipo en campo.
- Trabajos: Son todos los trabajos reportados por el técnico en el software, la orden de trabajo se asigna a un técnico y él es el encargado de alimentar la hoja de vida del equipo mediante estos reportes.
- Estado: Estado de la OT, este estado cambia dependiendo la acción que toma en ese momento el técnico con la OT programada, si el técnico reporta una orden de trabajo el estado cambia, si la orden de trabajo se termina la orden de trabajo cambia su estado, si se crea una nueva OT esta aparece como nueva etc.
- Horómetro: Registro numérico de horas de trabajo del equipo al momento del técnico haber realizado el reporte de la orden de trabajo programada.

- Valor M.O: Valor de mano de obra teórica que calcula el software dependiendo el reporte del técnico acerca de las horas trabajadas al equipo en esa orden de trabajo.

Esta hoja de vida también comprende un apartado muy importante que son los repuestos y herramientas usadas en cada orden de trabajo con su costo asociado, de esta manera se pueden obtener datos precisos de los insumos usados en cada trabajo:

REPUESTOS CAMBIADOS					
Referencia	Nombre	Cantidad	OT	Fecha	Valor
ADH ECO 35x16	ADHESIVO LOGO-CEDES-DATOS Ecorental	3	OTT - 1443	29/01/2018	\$ 9.300
ADH ECO 26x12	ADHESIVO LOGO-DATOS Ecorental	5	OTT - 1443	29/01/2018	\$ 13.000
DESENGRASANTE INDUSTRIAL	DESENGRASANTE INDUSTRIAL	3	OTT - 1749	27/07/2018	\$ 63.742
DIELECTRICO POR TAMBOR	DIELECTRICO DESODORIZADO	8	OTT - 1749	27/07/2018	\$ 270.633
15W40	ACEITE 15W40 (TAMBOR X 55GL)	1	OTT - 1749	27/07/2018	\$ 42.836
15W40	ACEITE 15W40 (TAMBOR X 55GL)	1	OTT - 1902	23/11/2018	\$ 24.545
PH3614/B228/BT223/P550335/A18/140517	FILTRO DE ACEITE PARA CLASSIC-300/MANLIFT JLG450, 600, 800/GENIE600/SERVO MONTACARGA	1	OTT - 1902	23/11/2018	\$ 8.903
BF790/P550345/GS162/6.2004.0	FILTRO DE COMBUSTIBLE PARA COMPRESOR CK375/JLG600/TRACCESS	1	OTT - 1902	23/11/2018	\$ 18.000
AZFP9577/2175.272/FP2175-272	FILTRO DE AIRE TRACCESS MOTOR GRANDE	1	OTT - 1902	23/11/2018	\$ 28.000
Mariposa Traccess 170	Mariposa metalica para guardas Traccess 170	1	OTT - 1902	23/11/2018	\$ 15.000

*Figura 12 - Repuestos usados en cada orden de trabajo en la hoja de vida del equipo*

Esta información completa obtenida de la hoja de vida se saca finalmente de los 4 equipos mencionados previamente, se filtra la información necesaria y se organiza para poder empezar a realizar el análisis respectivo.



## 7. Desarrollo del análisis estadístico

### 7.1 Obtención y organización de base de datos

#### 7.1.1 Selección de datos

Antes de emplear las herramientas analíticas, primero debemos abordar la entrada y selección de datos. Para utilizar el análisis de datos, la discusión se aborda en definir de dónde provienen los datos y qué tan válidos son en realidad (Utilizing Advanced Statistical Reliability Methods to Improve Overall Asset Performance - Reliabilityweb: A Culture of Reliability, n.d.). Principalmente usaremos datos de eventos de fallas que describan situaciones con consecuencia tales como:

- Pérdida completa de función.
- Pérdida parcial de función.

Generalmente, con el paso del tiempo, las circunstancias, el personal y diversos factores hacen que las observaciones no se registren con la precisión que el análisis requiere. Por ello se leyó cada dato registrado y se seleccionó las actividades de mantenimiento que por lo general fueron labores correctivas y actividades durante el uso de los activos con daño parcial.

SAMM es el software de mantenimiento empleado en Ecorental, una de las principales falencias para el registro de la información es no tener la adecuada partición de los sistemas y subsistemas de los activos, por ello el análisis no puede llegar a tener un alcance más amplio, las variables que se registran en el son:

- OT.
- Fecha
- Trabajo:

- Técnico:
- Estado:
- Horómetro:
- Duración:
- Valor M.O:
- Valor Repuesto

### ***7.1.2 Limpieza de datos***

Las bases de datos obtenidas de SAMM corresponden a las Hojas de vida de los equipos correspondientes, para los activos tipo Manlift Traces 170, entregan información recopilada desde el 31 de enero del año 2017 hasta la actualidad, allí se plasmaron las actividades realizadas por el departamento de mantenimiento u operadores de los 4 activos. Los seriales internos de la compañía para los activos seleccionados a analizar son:

- ECOTRACCESS17001
- ECOTRACCESS17004
- ECOTRACCESS17010
- ECOTRACCESS17009

El análisis de la información se realiza de manera conjunta (se convino todos los registros) ya que los activos son de la misma marca, del mismo modelo, prestan los mismos servicios y por supuesto su diseño es igual, por ello el cálculo de la confiabilidad se aplica de igual forma para cada activo. Otro limitante del estudio de caso es que al no contar con particiones de los sistemas y subsistemas del activo y además de no ser especificado por el software, el análisis se realiza para la maquina en conjunto.

Los datos están organizados en orden de fecha, desde la actividad más antigua hasta la más reciente. De acuerdo a los condicionales descritos en la selección de datos, se identificaron datos de OTS (alistamientos), datos incompletos, incorrectos, inexactos y no pertinentes, de los cuatro activos en el transcurso del tiempo, es decir el «data duty» fue eliminado. Cabe aclarar que no se usaron datos censurados para el estudio de confiabilidad ya que no pertenece al alcance de este proyecto.

Hecha la limpieza, la base debe ser organizada de menor a mayor en el campo “Horómetro” ya que es un paso fundamental del análisis de la información. Se agrega una Columna “i” en la tabla 3 que representa el número del dato correspondiente a cada fila horizontal. Se obtiene que de los 4 equipos a analizar hay un i total = 44, es decir 44 datos muestrales de averías y fallas en los Manlift Traces 170 de la empresa ECORENTAL. A continuación, se muestra la base de datos con sus primeros 20 datos.

i	OT	Fecha Documento	Trabajos	Tecnico	Estado	Horometro	Duración	Valor M.O.	Valor Repuesto
1	OTE-4887	2017-02-14	Se realiza cambio de una manguera del sistema hidráulico p...	SAMIR ARGUMEDO	Cerrada	122	8	97256	90000
2	OTE-5304	2017-11-29	equipo que no funciona electricamente, se encuentra braker...	ANDRES RESTREPO PARRA	Cerrada	127	5	50570	0
3	OTE-7033	2019-12-30	Se realiza verificación del equipo, batería descargada posibili...	Jhon Jairo Quintana Gonzalez	Cerrada	150	4	25141	0
4	OTT-2737	2020-02-12	se pide gato empaquetado se realiza instalación se realizan ...	Juan Manuel Mendez Quete	Cerrada	276	2	13166	458177
5	OTE-4972	2017-04-21	Se cambian manguera hidráulica se suministra 5 galones de...	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	Cerrada	408	2	26478	0
6	OTE-4984	2017-05-02	Se realiza inspección general se ajustan mangueras equipo ...	SAMIR ARGUMEDO	Cerrada	464	1	12157	0
7	OTT-1749	2018-08-04	Se enderose protector frontal de los mandos de la canasta. ...	Victor Andres Gutierrez	Cerrada	466	7	74558	377211
8	OTE-5002	2017-05-09	inspección genreal cambio de burbuja nivelador de la maqu...	SAMIR ARGUMEDO	Cerrada	501	3	32419	0
9	OTE-7282	2020-10-09	Se realiza revisión de equipo el cual el brazo no sube se cali...	ANDRES RESTREPO PARRA	Cerrada	541	1	10114	0
10	OTE-5035	2017-06-05	Se realiza mantenimiento preventivo, cambio de filtros, acei...	Dairo Miguel Cardales Julio	Cerrada	587	3	36471	103899
11	OTE-5080	2017-07-13	Se realiza calibración de válvula de retención en cilindro, se ...	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	Cerrada	655	4	52956	0
12	OTE-6065	2018-11-08	El equipo se encuentra operativo. Diagnostico: presenta fug...	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	Cerrada	679	1	13239	0
13	OTT-1902	2018-11-23	Trabajo: Cambio de aceite del motor, filtros, arreglo del con...	Oriando Vargas Romero	Cerrada	742	1	13958	94448
14	OTT-1937	2018-11-23	Mantenimiento cilindros traces 170	Oriando Vargas Romero	Cerrada	859	11	129140	917601
15	OTE-5118	2017-08-01	el equipo se encuentra parado por fuga de combustible, el ...	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	Cerrada	955	5	66195	15000
16	OTE-7487	2021-03-03	El equipo se encuentra con ACPM en el tanque hidráulico p...	SAMIR ARGUMEDO	Cerrada	960	2	24314	279091
17	OTE-6390	2019-04-06	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE EQUIPO: equipo que present...	ANDRES RESTREPO PARRA	Cerrada	971	4	40456	0
18	OTE-6391	2019-04-08	DESCRIPCIÓN ESTADO DEL EQUIPO:Equipo que se encuentr...	ANDRES RESTREPO PARRA	Cerrada	982	3	30342	0
19	OTE-6411	2019-04-15	DESCRIPCION DEL ESTADO DEL EQUIPO : El equipo s encue...	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	Cerrada	1028	3	39717	0
20	OTE-6433	2019-04-29	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO: nivel de aceite motor bajo se en...	luis gabriel martinez castillo	Cerrada	1028	1	4858	0

Tabla 3 - Base de datos de fallas para Manlift Traces 170, primero 20 datos de 44.

### 7.1.3 Crecimiento de la confiabilidad – Método de Duane

El método de Duane determina ciertas características o recomendaciones en la implementación de metodologías asociadas al RCM, con el fin de ayudar al crecimiento de la

confiabilidad del sistema o equipo estudiado (Modarres et al., 2017). De acuerdo al cálculo de  $\beta$ , estimado con las horas de falla se puede tomar decisiones de un primer paso en la mejora de la gestión del activo, los valores de  $\beta$  se interpretan de acuerdo a la siguiente tabla.

$\beta$	Interpretación
0.4 – 0.6	La máxima prioridad del programa es la eliminación de los modos de falla. El programa utiliza pruebas aceleradas y sugiere un análisis inmediato y una acción correctiva eficaz para todas las fallas.
0.0 – 0.2	El programa no da prioridad a la mejora de la fiabilidad. Los datos de fallas no se analizan. Se toman medidas correctivas para modos de falla importantes, pero con baja prioridad.
0.2 – 0.3	El programa presta atención rutinaria a la mejora de la confiabilidad. El programa no utiliza pruebas ambientales aplicadas. Se toman medidas correctivas para modos de falla importantes.
0.3 – 0.4	El programa da prioridad a la mejora de la confiabilidad. El programa utiliza pruebas ambientales normales y análisis bien gestionados. Se toman medidas correctivas para modos de falla importantes.

Tabla 12- Interpretación del valor  $\beta$  para el método de Duane

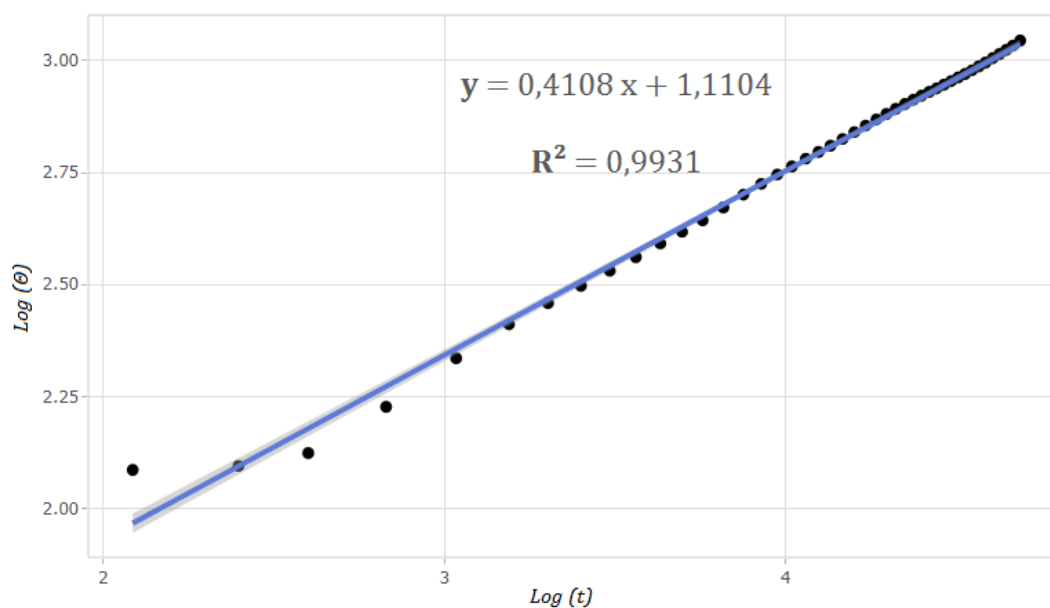


Figura 36 - Ploteo método de Duane

i	Horas de falla	Horas de falla Acumulada (t)	$\Theta = (t/N)$	Log (t)	Log ( $\Theta$ )
1	122	122	122.0000	2.086360	2.086360
2	127	249	124.5000	2.396199	2.095169
3	150	399	133.0000	2.600973	2.123852
4	276	675	168.7500	2.829304	2.227244
5	408	1083	216.6000	3.034628	2.335658
6	464	1547	257.8333	3.189490	2.411339
7	466	2013	287.5714	3.303844	2.458746
8	501	2514	314.2500	3.400365	2.497275
9	541	3055	339.4444	3.485011	2.530769
10	587	3642	364.2000	3.561340	2.561340
11	655	4297	390.6364	3.633165	2.591773
12	679	4976	414.6667	3.696880	2.617699
13	742	5718	439.8462	3.757244	2.643301
14	859	6577	469.7857	3.818028	2.671900
15	955	7532	502.1333	3.876910	2.700819
16	960	8492	530.7500	3.929010	2.724890
17	971	9463	556.6471	3.976029	2.745580
18	982	10445	580.2778	4.018908	2.763636
19	1028	11473	603.8421	4.059677	2.780923
20	1028	12501	625.0500	4.096945	2.795915
21	1057	13558	645.6190	4.132196	2.809976
22	1145	14703	668.3182	4.167406	2.824983
23	1216	15919	692.1304	4.201916	2.840188
24	1269	17188	716.1667	4.235225	2.855014
25	1287	18475	739.0000	4.266584	2.868644
26	1287	19762	760.0769	4.295831	2.880858
27	1296	21058	779.9259	4.323417	2.892053
28	1327	22385	799.4643	4.349957	2.902799
29	1327	23712	817.6552	4.374968	2.912570
30	1332	25044	834.8000	4.398704	2.921582
31	1333	26377	850.8710	4.421225	2.929864
32	1359	27736	866.7500	4.443044	2.937894
33	1407	29143	883.1212	4.464534	2.946020
34	1446	30589	899.6765	4.485565	2.954086
35	1496	32085	916.7143	4.506302	2.962234
36	1513	33598	933.2778	4.526313	2.970011
37	1588	35186	950.9730	4.546370	2.978168
38	1683	36869	970.2368	4.566661	2.986878
39	1722	38591	989.5128	4.586486	2.995421
40	1889	40480	1012.0000	4.607241	3.005181
41	1946	42426	1034.7805	4.627632	3.014848
42	1952	44378	1056.6190	4.647168	3.023918
43	2061	46439	1079.9767	4.666883	3.033414
44	2337	48776	1108.5455	4.688206	3.044754

Tabla 4 – Horas de fallas y falla acumulada



#### 7.1.4 Función inicial de densidad de probabilidad

Es de interés para el análisis determinar cuál es el comportamiento inicial de las fallas en el transcurso de la vida útil de los activos, por ello se realiza un histograma inicial de distribución de densidad de frecuencia acumulada (PDF).

Se empleó Excel y R, para graficar las particiones, con ancho de clase 5 y 20. Para suavizar la gráfica de densidad se emplea R, este realiza interacciones para anchos de clase muy pequeños, lo cual logra una mejora en la curva.

# Parti	Intervalo min	Intervalo Max	Tiempo Medio del intervalo	Conteo
1	122	565	343.5	9
2	565	1008	786.5	9
3	1008	1451	1229.5	16
4	1451	1894	1672.5	6
5	1894	2337	2115.5	3
6	2337	2780	2558.5	1

Tabla 4 - Particiones = 5 para hallar PDF de horas de falla Manlift Traccas 170

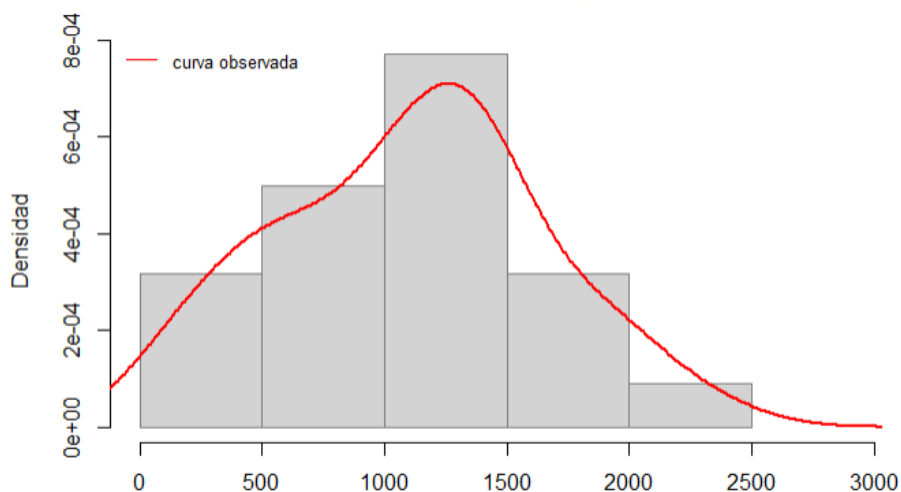


Figura 13 - Histograma de fallas para 5 particiones

# Partí	Intervalo min	Intervalo Max	Tiempo Medio del intervalo	Conteo
1	122.00	232.75	177.375	3
2	232.75	343.50	288.125	1
3	343.50	454.25	398.875	1
4	454.25	565.00	509.625	4
5	565.00	675.75	620.375	2
6	675.75	786.50	731.125	2
7	786.50	897.25	841.875	1
8	897.25	1008.00	952.625	4
9	1008.00	1118.75	1063.375	3
10	1118.75	1229.50	1174.125	2
11	1229.50	1340.25	1284.875	8
12	1340.25	1451.00	1395.625	3
13	1451.00	1561.75	1506.375	2
14	1561.75	1672.50	1617.125	1
15	1672.50	1783.25	1727.875	2
16	1783.25	1894.00	1838.625	1
17	1894.00	2004.75	1949.375	2
18	2004.75	2115.50	2060.125	1
19	2115.50	2226.25	2170.875	0
20	2226.25	2337.00	2281.625	0
21	2337.00	2447.75	2392.375	1

Tabla 5 - Particiones = 20 para hallar PDF de horas de falla Manlift Tracces 170



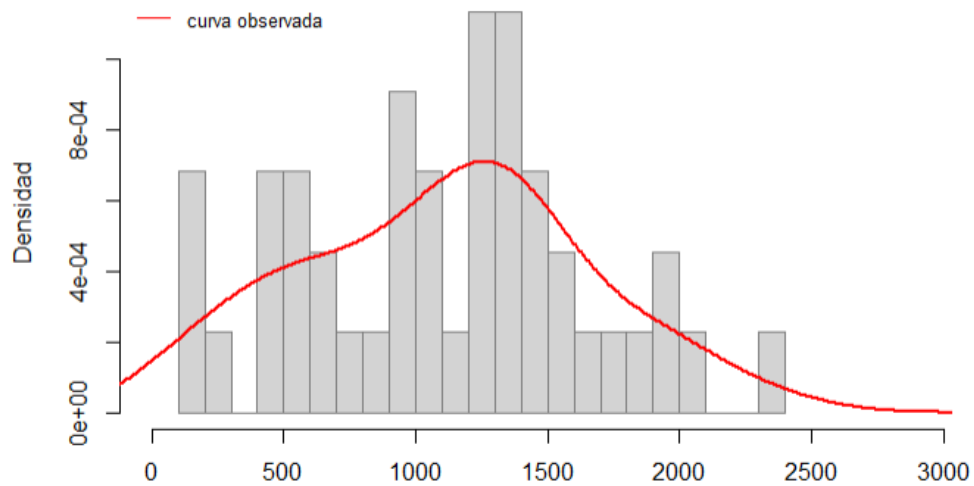
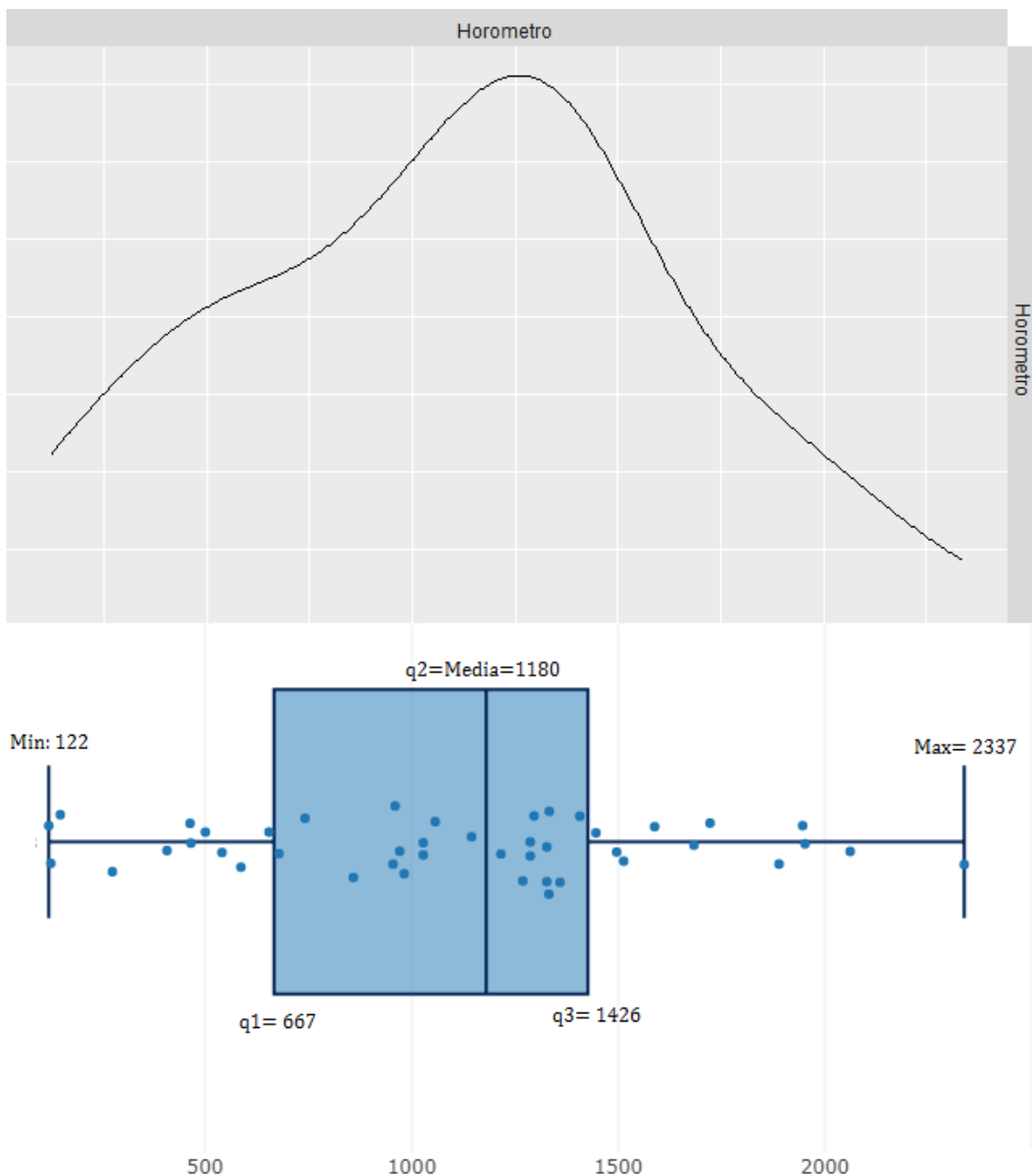


Figura 14 - Histograma de fallas para 20 particiones



*Figura 15 - PDF y Boxplot de Fallas*

De los histogramas, la distribución de densidad de frecuencia inicial y el boxplot podemos concluir del comportamiento de los datos registrados por las horas de fallas reportadas por el horómetro de los equipos: La primera hora de falla es reportada a las 122 horas, el valor máximo es 2337, en la caja del boxplot desde el cuartil 1 al 3 se concentra la mayor cantidad de información (reflejada por los puntos), la media de horas es 1180 (que se puede interpretar como

el MTBF de una distribución normal). El comportamiento de la curva tiende a describir un comportamiento de distribución normal, pero se observa un leve sesgo en la cola derecha, por ello se deberían realizar pruebas de normalidad para determinar dicho comportamiento, pero es importante aplicar las otras distribuciones para conocer el comportamiento de los datos.

## **7.2. Modelos Estadísticos**

A continuación, se desarrollan tres modelos estadísticos que buscan describir de la mejor forma los datos reales observados para las fallas de los Manlitf, con ellos se pretende seleccionar el mejor ajuste y “predecir” el comportamiento de fallas. Se emplea las distribuciones Normal, Weibull de dos parámetros y Log Normal.

### ***7.2.1. Distribución Normal***

Como se observó en los gráficos de la función inicial de densidad de probabilidad, los datos poseen una curva que asemeja a una distribución normal, por ello la primera distribución a analizar es esta. En la siguiente ilustración se observa que la curva observada (rojo) tiene un comportamiento similar a la curva teórica normal (azul), es decir que esta podría simular el comportamiento de fallas para los datos analizados a través de dicha distribución.

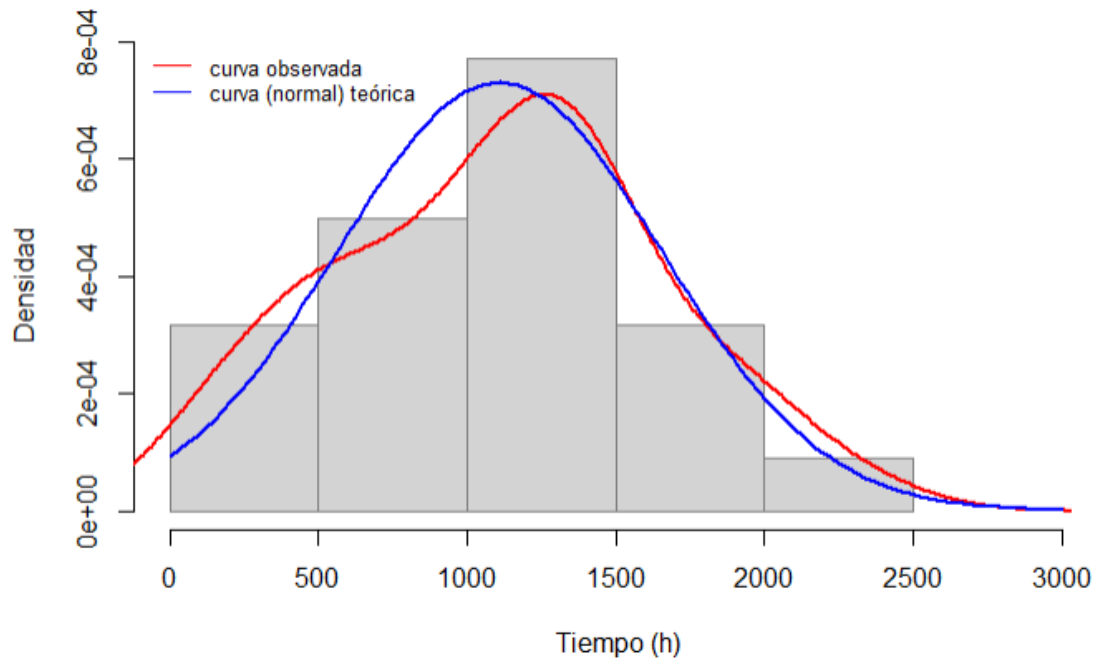


Figura 16 – Curva observada vs teórica, densidad y tiempo

La distribución de probabilidad continua más conocida e importante es la distribución normal (a veces llamada distribución gaussiana). Una PDF normal tiene la curva simétrica en forma de campana y su función corresponde a:

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

Donde los parámetros  $\mu$  denomina la media, y el parámetro  $\sigma$ , que se denomina desviación estándar (Modarres et al., 2017).

La media o  $\mu$  se determina como:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Donde:

N = Número total de datos

$X_i$  = Horas de falla reportadas

$$\mu = \frac{(122 + 127 + 150 + \dots)}{44}$$

$$\mu = \frac{48776}{44}$$

$$\mu = 1108.54$$

La desviación estándar muestral se calcula como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

Con los datos de horas de falla.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(122 - 1108.54)^2 + (127 - 1108.54)^2 + (150 - 1108.54)^2 + \dots}{44 - 1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{12800906.909}{43}}$$

$$\sigma = 545.6147$$

### 7.2.1.1 Función de Densidad de probabilidad de Normal (PDF) $f(t)$

Sustituyendo los valores en la PDF normal para  $\mu$  y  $\sigma$ , y graficando la ecuación.

$$\mu = 1108.54$$

$$\sigma = 545.6147$$

$$f(t) = \frac{1}{545.6147 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(t - 1108.54)^2}{545.6147^2} \right) \right]$$

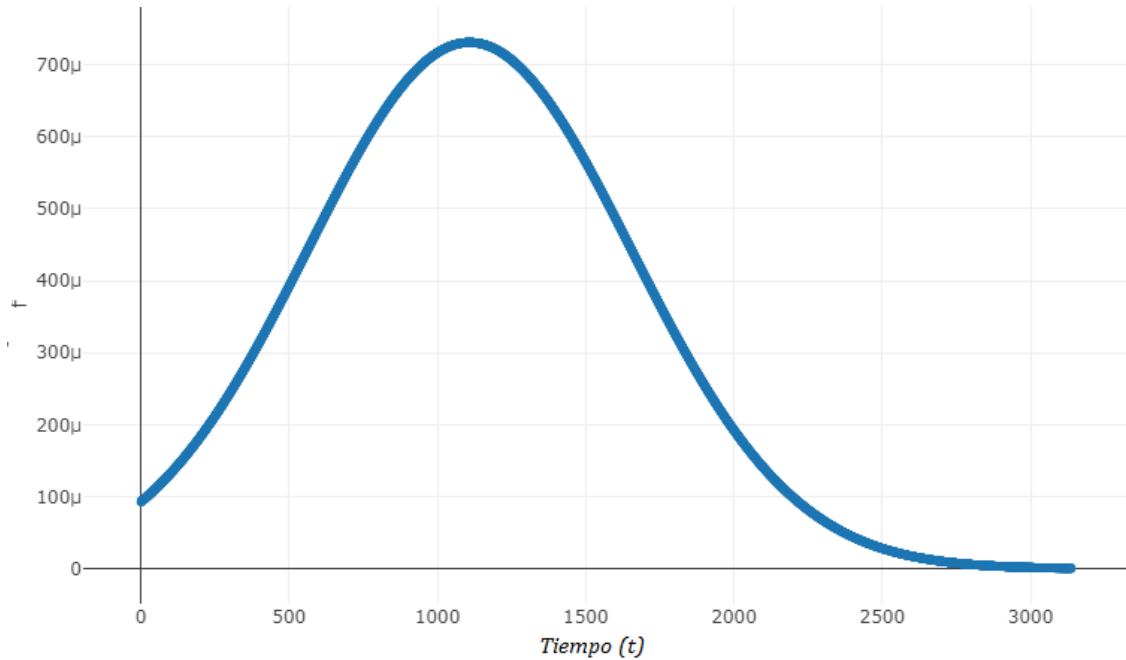


Figura 17 – Función de densidad de probabilidad normal

### 7.2.1.2 Función de Probabilidad de falla (Desconfiabilidad) Normal $F(t)$

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la función Desconfiabilidad  $F(t)$  para el modelo normal con valores  $\mu$  y  $\sigma$ , y graficando la ecuación.

$$\mu = 1108.54$$

$$\sigma = 545.6147$$

$$F_{(t)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\left(\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} dt$$

Sustituyendo en la ecuación

$$F_{(t)} = \frac{1}{545.6147 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(t - 1108.54)^2}{545.6147^2} \right) \right] dt$$

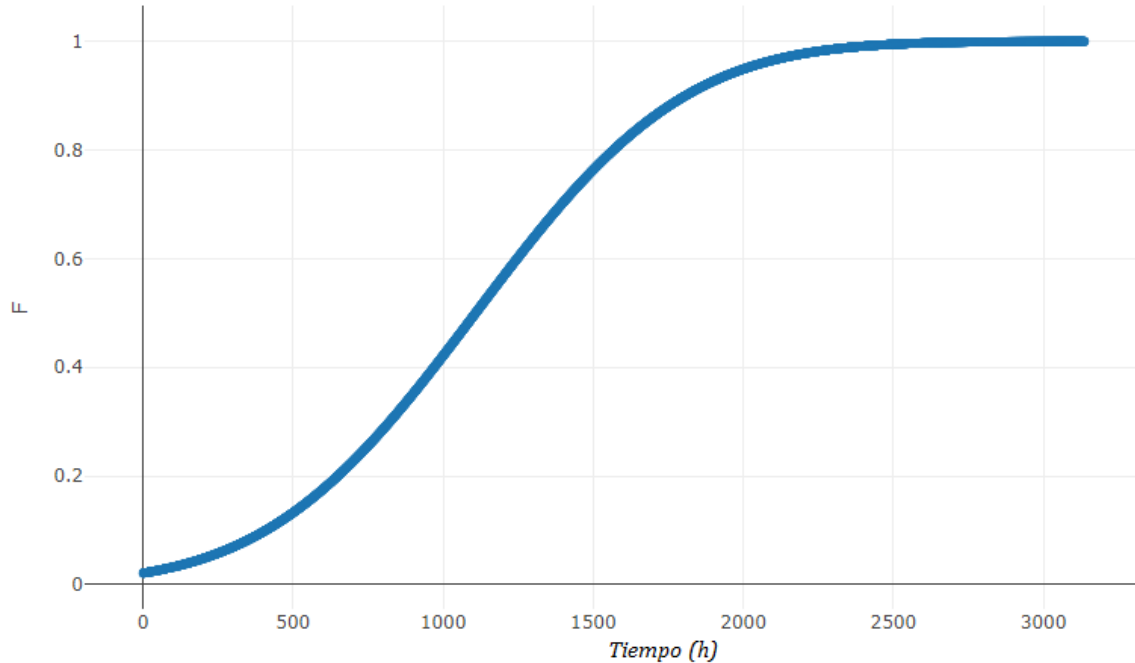


Figura 18 – Función de probabilidad de falla resultante

### 7.2.1.3 Función de Confiabilidad de Normal R(t)

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la función de Confiabilidad R(t) para el modelo normal con valores  $\mu$  y  $\sigma$ , y graficando la ecuación.

$$\mu = 1108.54$$

$$\sigma = 545.6147$$

$$R_{(t)} = 1 - F_{(t)}$$

Sustituyendo

$$R_{(t)} = 1 - \left( \frac{1}{545.6147 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(t - 1108.54)^2}{545.6147^2} \right) \right] dt \right)$$

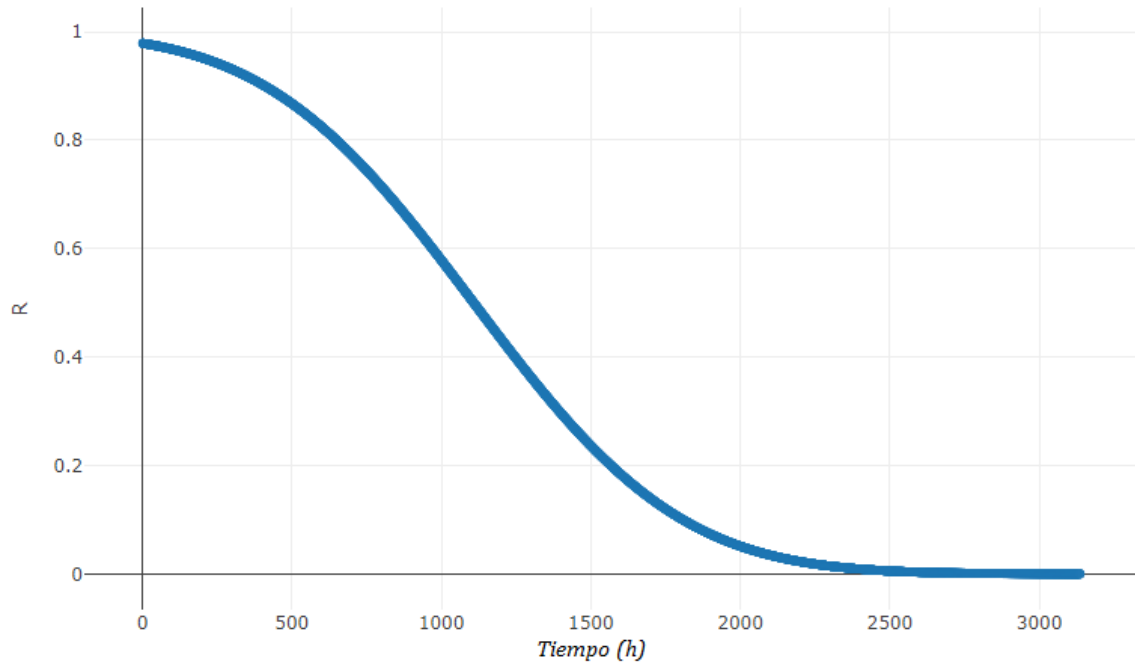


Figura 19 - Función de confiabilidad normal

#### 7.2.1.4 Función Hazard o Tasa de riesgo Normal $h(t)$ .

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la tasa de riesgo  $h(t)$  para el modelo normal con valores  $\mu$  y  $\sigma$ , y graficando la ecuación.

$$\mu = 1108.54$$

$$\sigma = 545.6147$$

$$h_{(t)} = \frac{f_{(t)}}{R_{(t)}}$$

Sustituyendo valores



$$h(t) = \frac{\frac{1}{545.6147 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(t - 1108.54)^2}{545.6147^2}\right)\right]}{1 - \left(\frac{1}{545.6147 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(t - 1108.54)^2}{545.6147^2}\right)\right] dt\right)}$$

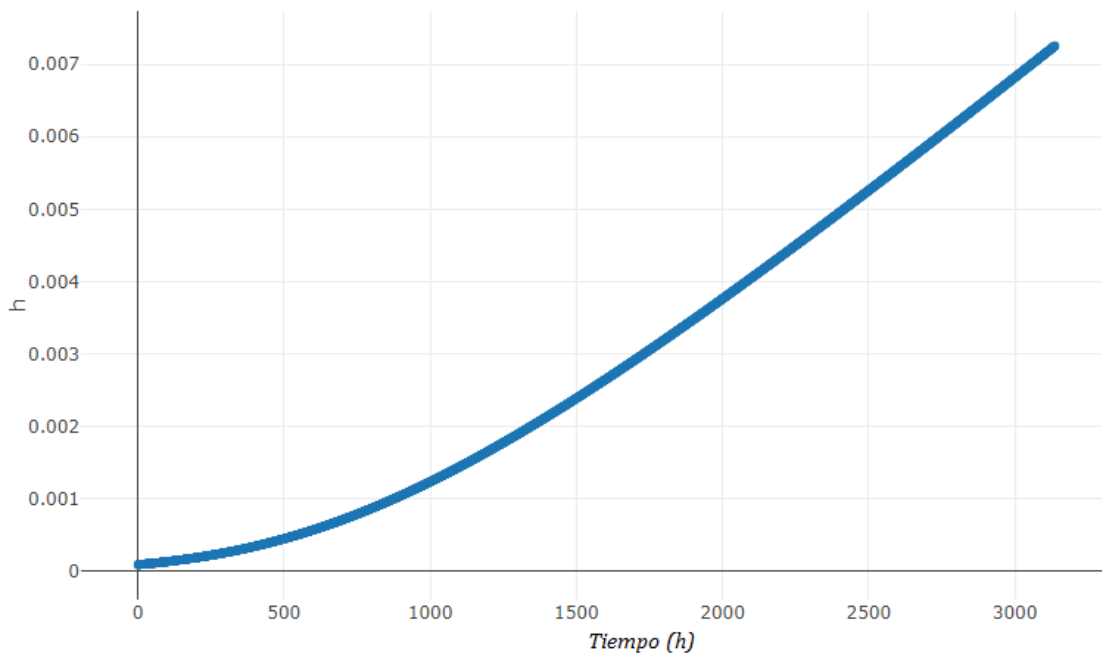


Figura 20 - Función Hazard

### 7.2.1.5 MTBF Tiempo medio entre fallas

De la tabla 2 en la página 40, se identifica la ecuación que representa el tiempo medio entre fallas para una distribución Normal con valores  $\mu$  y  $\sigma$ ,

$$MTBF = \mu = 1108.54 \text{ h}$$

MTBF representada en cada una de las funciones.

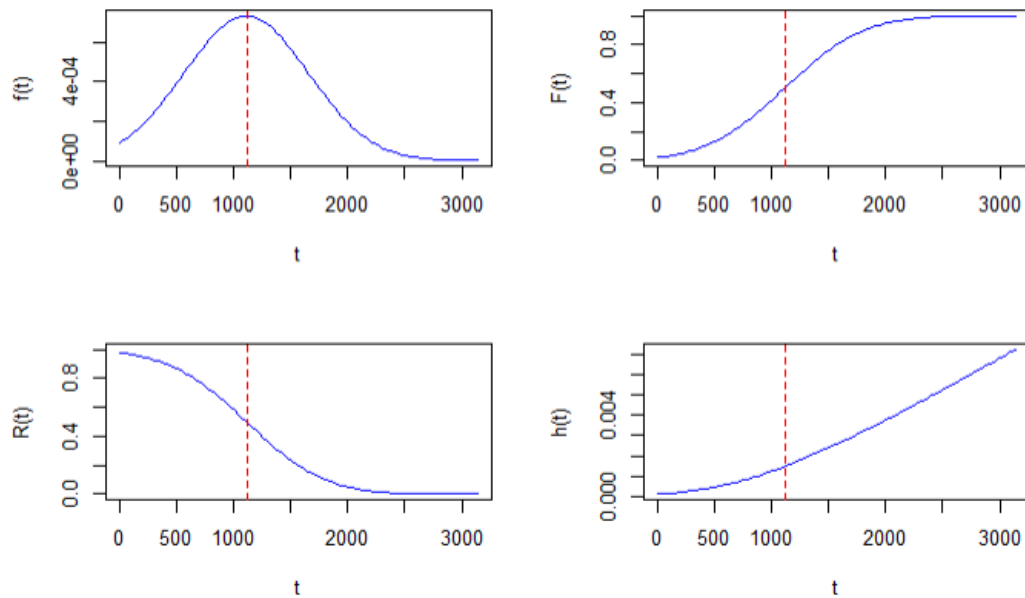


Figura 21 - MTBF por funciones

### **7.2.2 Distribución de Weibull 2P**

La segunda metodología empleada para determinar las funciones de confiabilidad, es la distribución de Weibull de dos parámetros, de amplio uso en la solución de problemas de averías y calidad de los equipos, con ella se busca determinar los parámetros de forma y llegar a concluir en qué estado se encuentra los activos. Existen diversos métodos para determinar los parámetros de la función, entre los que podemos enumerar (Calvo, 2017):

- Mínimos cuadrados.
- Gráfico de la función tasa de falla.
- Método de estimación de máxima verosimilitud
- Estimación de momentos.
- Estimadores lineales.
- Método de percentiles
- Método bayesiano

#### **7.2.2.1 Mínimos cuadrados**

Para el caso de estudio en concreto se desarrolla la metodología de mínimos cuadrados, ya que es la metodología más empleada en la literatura y de más fácil comprensión. Se busca a través de una función de la forma  $Y = mX + b$ , determinar los valores para el parámetro de forma Beta y el parámetro de escala Eta;

##### **7.2.2.1.1. Cálculo variable X**

La variable X se calcula como el Logaritmo natural de las horas de falla de los equipos, los valores se acomodan en una nueva columna

$$X_i = \ln (\text{Horometro})_i$$

Ejemplo: Para el dato  $i=1$

$$X_{i=1} = \ln(122) = 4.804021 \dots etc$$

i	Horometro	X	i	Horometro	X
1	122	4.804021	22	1145	7.043160
2	127	4.844187	23	1216	7.103322
3	150	5.010635	24	1269	7.145984
4	276	5.620401	25	1287	7.160069
5	408	6.011267	26	1287	7.160069
6	464	6.139885	27	1296	7.167038
7	466	6.144186	28	1327	7.190676
8	501	6.216606	29	1327	7.190676
9	541	6.293419	30	1332	7.194437
10	587	6.375025	31	1333	7.195187
11	655	6.484635	32	1359	7.214504
12	679	6.520621	33	1407	7.249215
13	742	6.609349	34	1446	7.276556
14	859	6.755769	35	1496	7.310550
15	955	6.861711	36	1513	7.321850
16	960	6.866933	37	1588	7.370231
17	971	6.878326	38	1683	7.428333
18	982	6.889591	39	1722	7.451242
19	1028	6.935370	40	1889	7.543803
20	1028	6.935370	41	1946	7.573531
21	1057	6.963190	42	1952	7.576610
22	1145	7.043160	43	2061	7.630947

Tabla 6 – Cálculo de mínimos cuadrados

### 7.2.2.1.2. Cálculo variable Y

Para el cálculo de la variable dependiente Y, se debe primero determinar los rangos medios, para el estudio de caso se emplea las aproximaciones de Bernard.

$$Bernard\ Median\ (BM) = Rango\ Medios = \frac{i - 0.3}{N - 0.4}$$

Donde:

$i$  = Es el número de dato de la muestra (Falla 1, Falla 2, Falla 3, etc.)

$N$  = La cantidad total de fallas. (44 en este caso)

Ejemplo: Dato  $i= 1$ :

$$BM_{i=1} = \frac{1 - 0.3}{44 + 0.4} = 0.0157658 \dots etc$$

Estas aproximaciones se interpretan como el valor porcentual de cada Falla con respecto al total de las mismas, por ejemplo para la Falla 1 porcentualmente representa el 1.58 % de la información recolectada y el dato Falla 44 representa el 98.42 % de la información recolectada observada. Graficando los rangos medios con respecto a las horas de falla se obtienen el comportamiento de la ilustración.

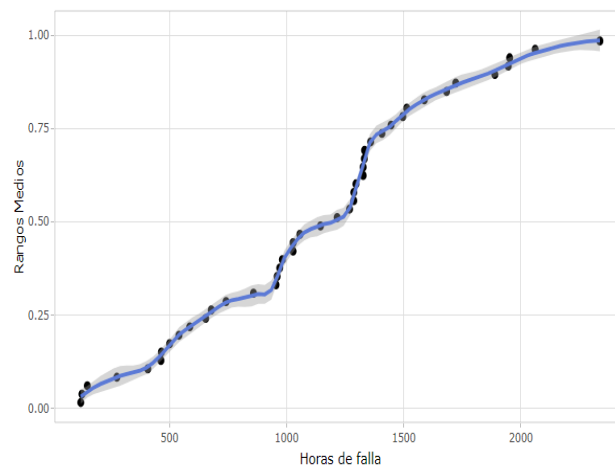


Figura 22 - Plot cálculo variable Y

A continuación, el valor del rango medio debe ser usado como un valor doble logarítmico en la ecuación.

$$Y_i = Ln \left[ Ln \left( \frac{1}{1 - F(t)_i} \right) \right]$$

Donde:

Ln= Logaritmo Natural

F(t)= Valor del Rango medio.

Ejemplo: Dato i=1

$$Y_{i=1} = \text{Ln} \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{1 - 0.0157658} \right) \right] = -4.141979 \dots \text{etc}$$

Se crean dos columnas para los rangos medios (BM) y el doble logaritmo (Y).

i	Horometro	X	BM	Y	i	Horometro	X	BM	Y
1	122	4.804021	0.01576577	-4.14197925	22	1145	7.043160	0.48873874	-0.39917313
2	127	4.844187	0.03828829	-3.24315445	23	1216	7.103322	0.51126126	-0.33417678
3	150	5.010635	0.06081081	-2.76878252	24	1269	7.145984	0.53378378	-0.27035863
4	276	5.620401	0.08333333	-2.44171640	25	1287	7.160069	0.55630631	-0.20749066
5	408	6.011267	0.10585586	-2.19025439	26	1287	7.160069	0.57882883	-0.14535421
6	464	6.139885	0.12837838	-1.98485985	27	1296	7.167038	0.60135135	-0.08373512
7	466	6.144186	0.15090090	-1.81045693	28	1327	7.190676	0.62387387	-0.02241868
8	501	6.216606	0.17342342	-1.65829883	29	1327	7.190676	0.64639640	0.03881559
9	541	6.293419	0.19594595	-1.52285305	30	1332	7.194437	0.66891892	0.10020000
10	587	6.375025	0.21846847	-1.40039417	31	1333	7.195187	0.69144144	0.16198588
11	655	6.484635	0.24099099	-1.28829097	32	1359	7.214504	0.71396396	0.22445267
12	679	6.520621	0.26351351	-1.18461344	33	1407	7.249215	0.73648649	0.28792001
13	742	6.609349	0.28603604	-1.08790149	34	1446	7.276556	0.75900901	0.35276432
14	859	6.755769	0.30855856	-0.99702147	35	1496	7.310550	0.78153153	0.41944269
15	955	6.861711	0.33108108	-0.91107331	36	1513	7.321850	0.80405405	0.48852875
16	960	6.866933	0.35360360	-0.82932814	37	1588	7.370231	0.82657658	0.56076892
17	971	6.878326	0.37612613	-0.75118516	38	1683	7.428333	0.84909910	0.63717556
18	982	6.889591	0.39864865	-0.67614080	39	1722	7.451242	0.87162162	0.71919171
19	1028	6.935370	0.42117117	-0.60376640	40	1889	7.543803	0.89414414	0.80900702
20	1028	6.935370	0.44369369	-0.53369135	41	1946	7.573531	0.91666667	0.91023509
21	1057	6.963190	0.46621622	-0.46559031	42	1952	7.576610	0.93918919	1.02961502
22	1145	7.043160	0.48873874	-0.39917313	43	2061	7.630947	0.96171171	1.18252786

Tabla 7 - Representación rangos medios y doble logaritmo

Con los datos de las variables X y Y, se genera la gráfica de regresión lineal.

### 7.2.2.2 Regresión lineal

Los datos de X y Y, se grafican, la configuración de puntos se puede representar perfectamente con una recta a través del método de mínimos cuadrados.

Con ayuda de R se determina la ecuación que describe el comportamiento de la recta.

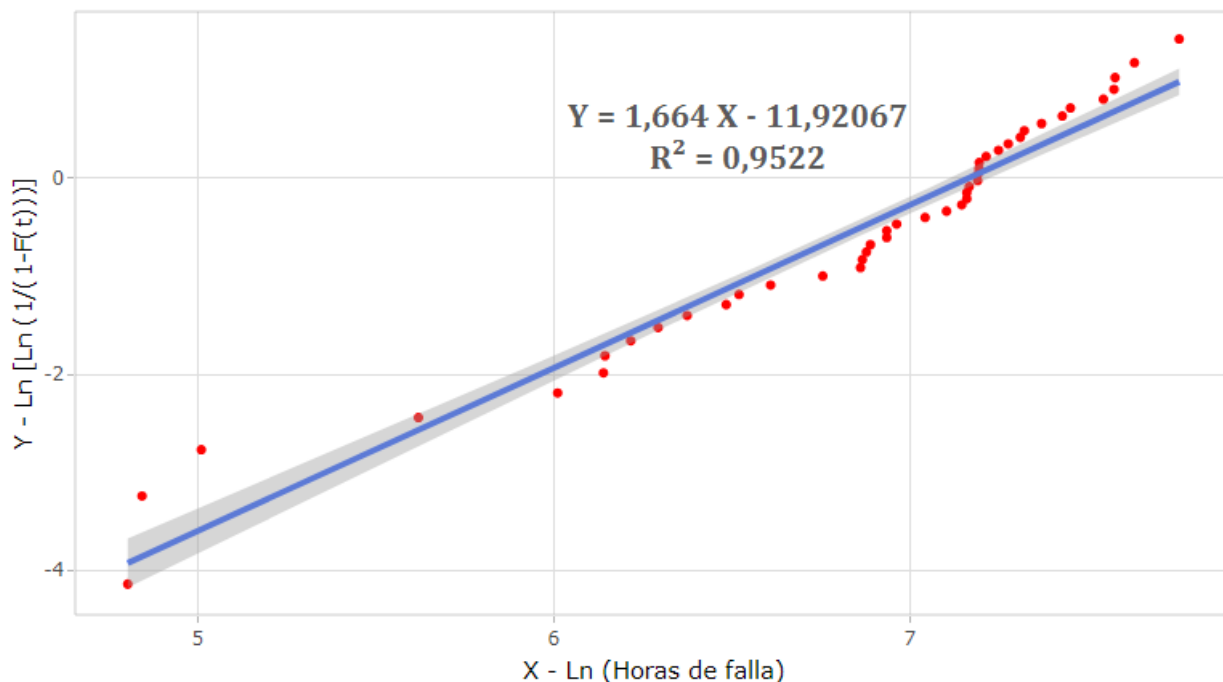


Figura 23 – Regresión lineal

El valor que acompaña a la X, representa la pendiente de la recta, pero la interpretación más importante es que dicho valor es beta, el parámetro de forma en las estimaciones de Weibull.

$$\beta = 1.664$$

Para  $\beta > 1$  la curva adopta ligeramente la forma de campana (En la gráfica PDF) y se asemejan a las curvas de una distribución normal, pero muestran algo de asimetría (Walpole et al., 2012). Indica dependencia de desgaste con del tiempo, lo cual es típicamente indicativo de un modo de falla dominante. Como se observa en la curva de la bañera, este valor mientras más alto sea más fuerte es su relación con el tiempo. El trabajo consiste en identificar los factores mecánicos, eléctricos, operacionales y humanos de los Manlift que representan las causas que desencadenan las fallas.(Troyer, n.d.)

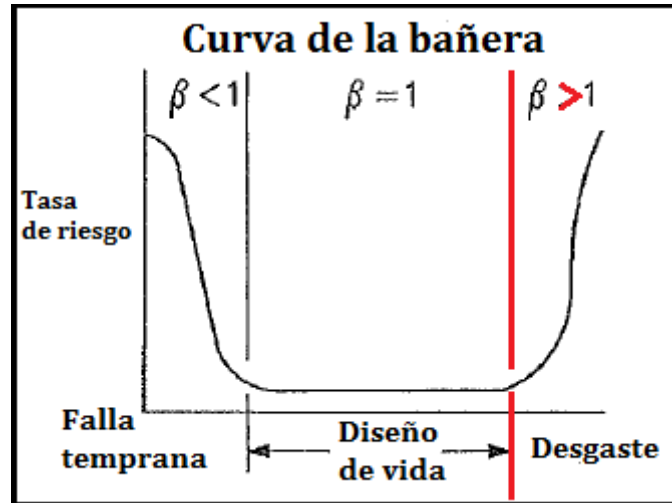


Figura 24 - Curva de la bañera

El siguiente parámetro de interés es el de eta ( $\eta$ ) o parámetro de escala, para ello se usa los valores de beta ( $\beta$ ) y el valor del intercepto calculado en la ecuación de mínimos cuadrados, así que:

$$\eta = e^{\left(\frac{\text{Intercepto}}{-\beta}\right)} = e^{\left(\frac{-11.9206}{-(1.664)}\right)} = 1291.7012$$

Con los valores de Beta y Eta conocidos, las funciones de confiabilidad se pueden determinar.

### 7.2.2.3 Función de Densidad de probabilidad de Weibull (PDF) $f(t)$

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la función de densidad  $f(t)$  para el modelo de Weibull con valores Beta y Eta.

$$\beta = 1.664 \text{ y } \eta = 1291.7012$$

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

Se reemplaza en la ecuación.

$$f(t) = \left(\frac{1.664}{1291.7012}\right) \left(\frac{t}{1291.7012}\right)^{(1.664-1)} e^{-\left(\frac{t}{1291.7012}\right)^{1.664}}$$



$$f(t) = 0.001288 \left( \frac{t}{1291.7012} \right)^{(0.664)} e^{-\left( \frac{t}{1291.7012} \right)^{1.664}}$$

Para valores de t se obtiene.

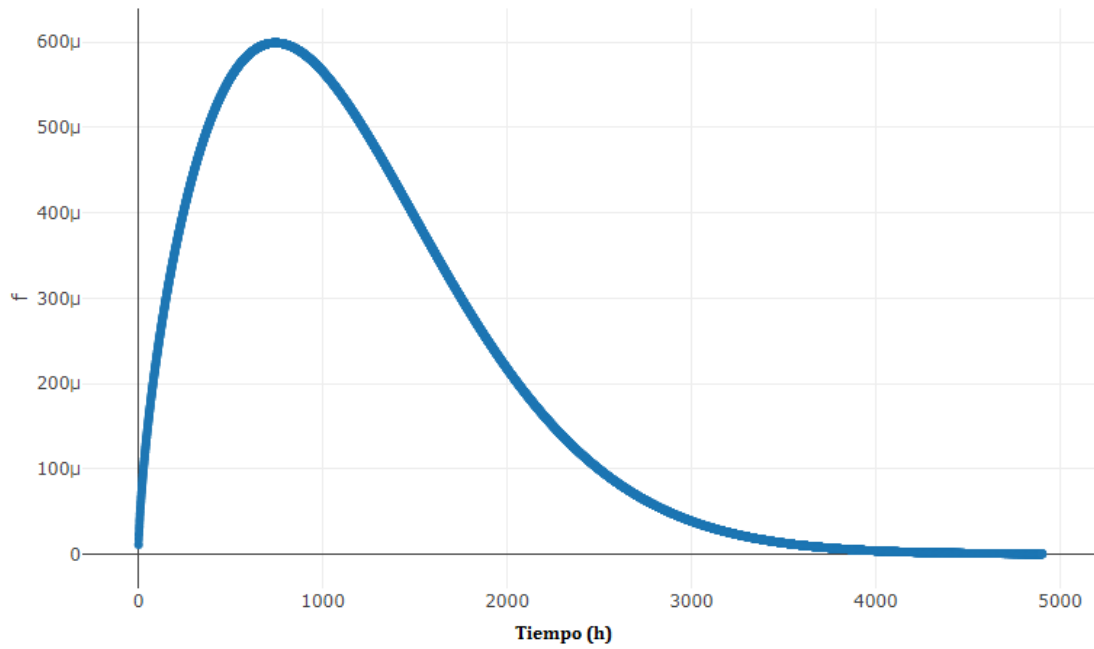


Figura 25 - Función densidad probabilidad de Weibull

#### 7.2.2.4 Función de Probabilidad de falla (Desconfiabilidad) de Weibull F(t).

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la función de probabilidad de falla F(t) para el modelo de Weibull con valores Beta y Eta.

$$\beta = 1.664 \text{ y } \eta = 1291.7012$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = 1 - e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}$$

Se reemplaza en la ecuación.

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t}{1291.7012} \right)^{1.664}}$$

La grafica del comportamiento en el tiempo t.

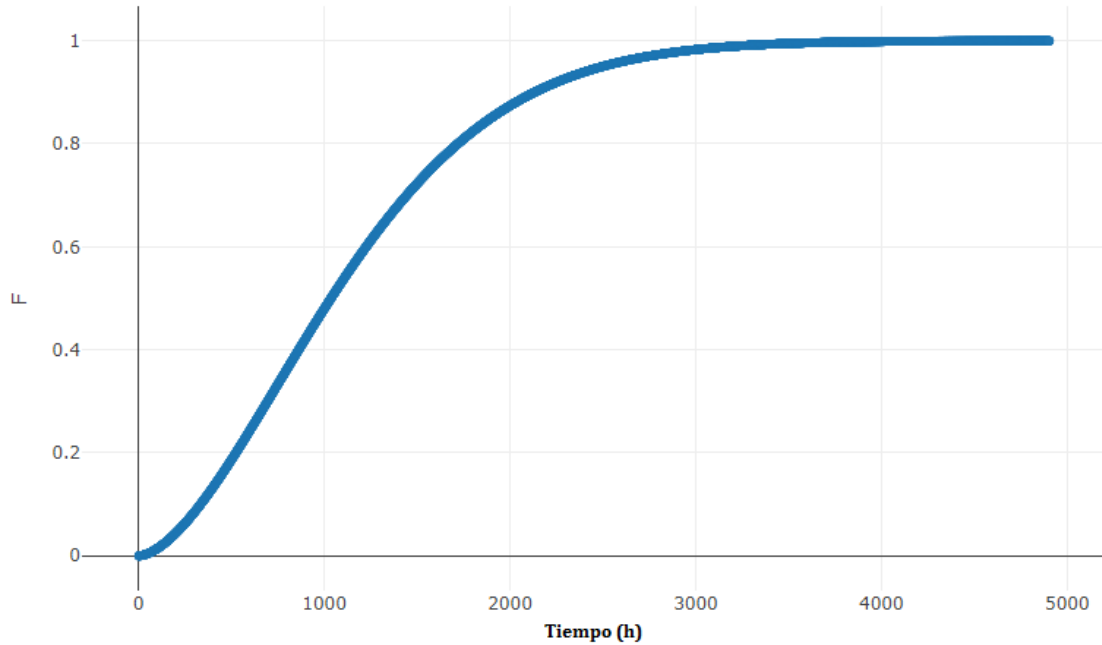


Figura 26 – Función probabilidad de falla de Weibull

### 7.2.2.5 Función de Confiabilidad de Weibull $R(t)$

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la función de Confiabilidad  $R(t)$  para el modelo de Weibull con valores Beta y Eta.

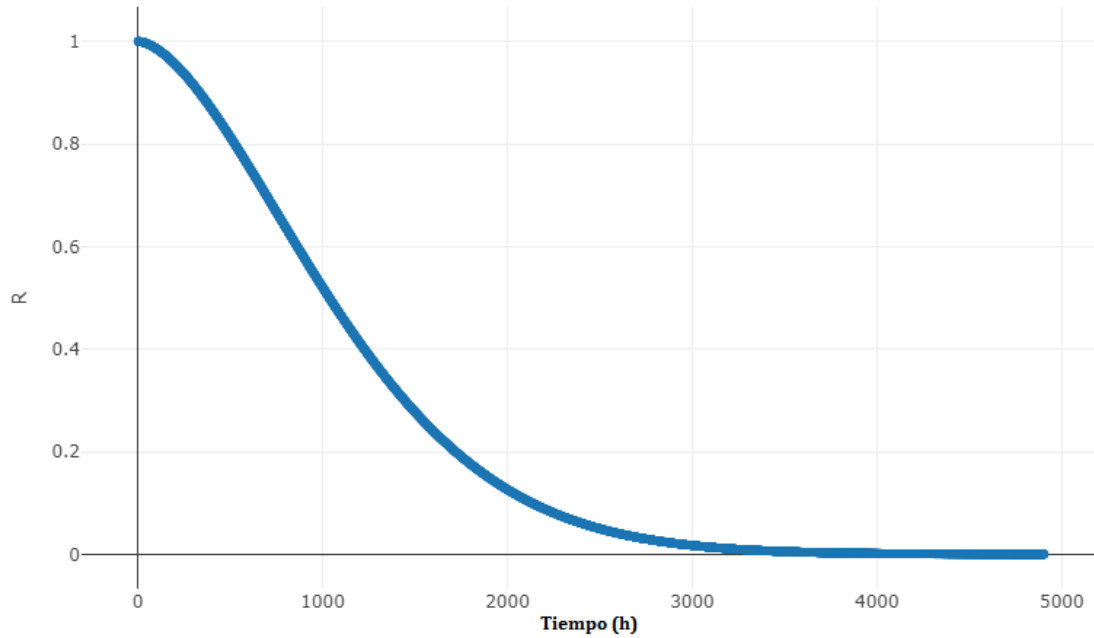
$$\beta = 1.664 \text{ y } \eta = 1291.7012$$

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

Se reemplaza en la ecuación.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{1291.7012}\right)^{1.664}}$$

La grafica del comportamiento en el tiempo t.



*Figura 27 - Función confiabilidad de Weibull*

#### **7.2.2.6 Función Hazard o Tasa de riesgo de Weibull $h(t)$ .**

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa la función de tasa de falla  $h(t)$  para el modelo de Weibull con valores Beta y Eta.

$$\beta = 1.664 \text{ y } \eta = 1291.7012$$

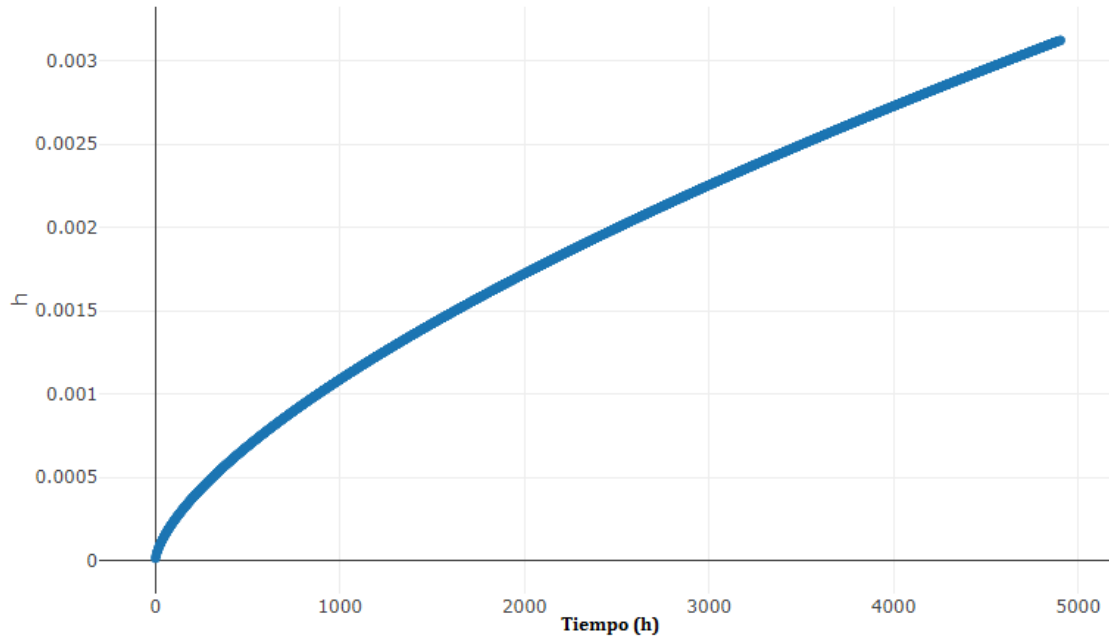


Figura 28 - Función de Hazard Weibull

### 7.2.2.7 MTBF Tiempo medio entre fallas

De la tabla 2 página 40, se identifica la ecuación que representa el tiempo medio entre fallas para una distribución de Weibull con valores beta y eta.

$$\beta = 1.664 \text{ y } \eta = 1291.7012$$

$$MTBF = \eta \Gamma \left[ 1 + \frac{1}{\beta} \right]$$

$$MTBF = 1291.7012 \Gamma \left[ 1 + \frac{1}{1.664} \right] = 1154.2905 \text{ h}$$

Don la la función Gamma representa

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} x^{t-1} e^{-x} dx$$

MTBF representada en cada una de las funciones.

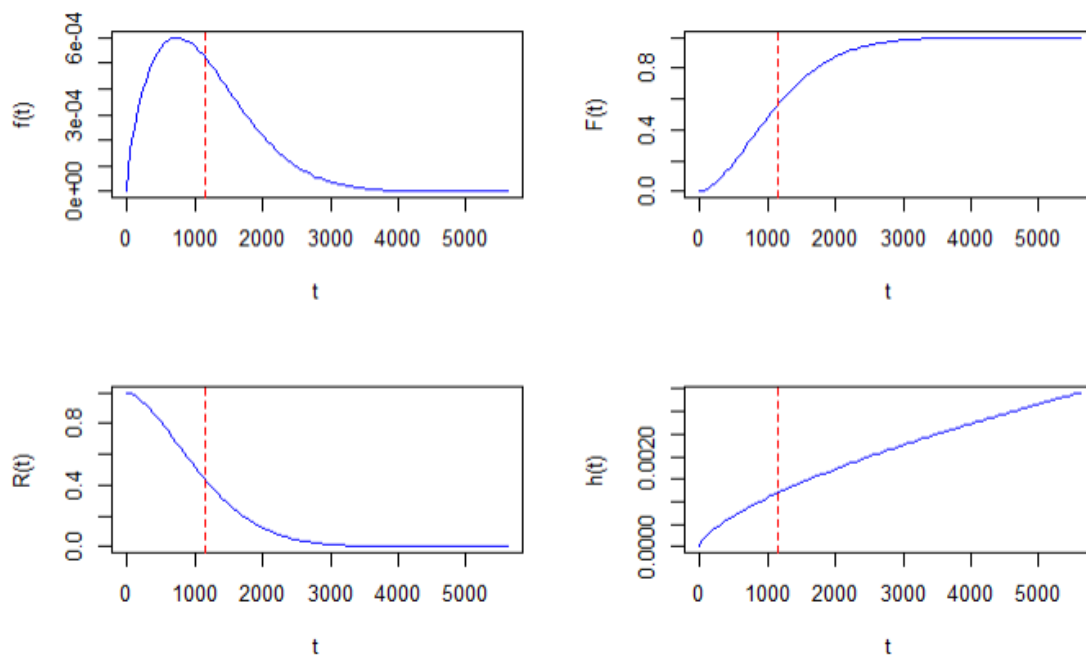


Figura 29 – MTBF representado en distintas funciones

### 7.2.3 Distribución Log Normal

La distribución Log Normal es una variante de la distribución normal se obtiene cuando los logaritmos de una Variable se describen mediante una distribución normal. Donde los parámetros  $\mu(\ln)$  denomina la media de los logaritmos naturales de la variable tiempo, y el parámetro  $\sigma(\ln)$ , que se denomina desviación estándar de los logaritmos (Modarres et al., 2017). De acuerdo a la tabla 2 la función PDF para esta es.

$$f_{(t)} = \frac{1}{(\sigma_{\ln(x)}\sqrt{2\pi})t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}}\right)^2}$$

La media o  $\mu(\ln)$  se calcula como:

$$\mu_{\ln(x)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x)_i$$

Donde:

N = Número total de datos

Xi= Horas de falla reportadas

$$\mu_{\ln(x)} = \frac{(\ln(122) + \ln(127) + \ln(150) + \dots)}{44}$$

$$\mu_{\ln(x)} = \frac{300.41511}{44}$$

$$\mu_{\ln(x)} = 6.82761$$

La desviación estándar muestral se calcula como:

$$\sigma_{\ln(x)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(x_i) - \mu_{\ln(x)})^2}$$

Con los datos de horas de falla.

$$\sigma_{\ln(x)} = \sqrt{\frac{(\ln(122) - 6.82761)^2 + (\ln(127) - 6.82761)^2 + (\ln(150) - 6.82761)^2 + \dots}{44 - 1}}$$

$$\sigma_{\ln(x)} = \sqrt{\frac{21,85588524}{43}}$$

$$\sigma_{\ln(x)} = 0,7129$$

### 7.2.3.1 Función de Densidad de probabilidad de Log Normal (PDF) f(t)

Sustituyendo los valores en la PDF Log normal para  $\mu(\ln)$  y  $\sigma(\ln)$ , y graficando la ecuación.

$$\mu_{\ln(x)} = 6.82761$$

$$\sigma_{\ln(x)} = 0,7129$$

$$f(t) = \frac{1}{(0.7129\sqrt{2\pi})t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-6.82761}{0.7129}\right)^2}$$

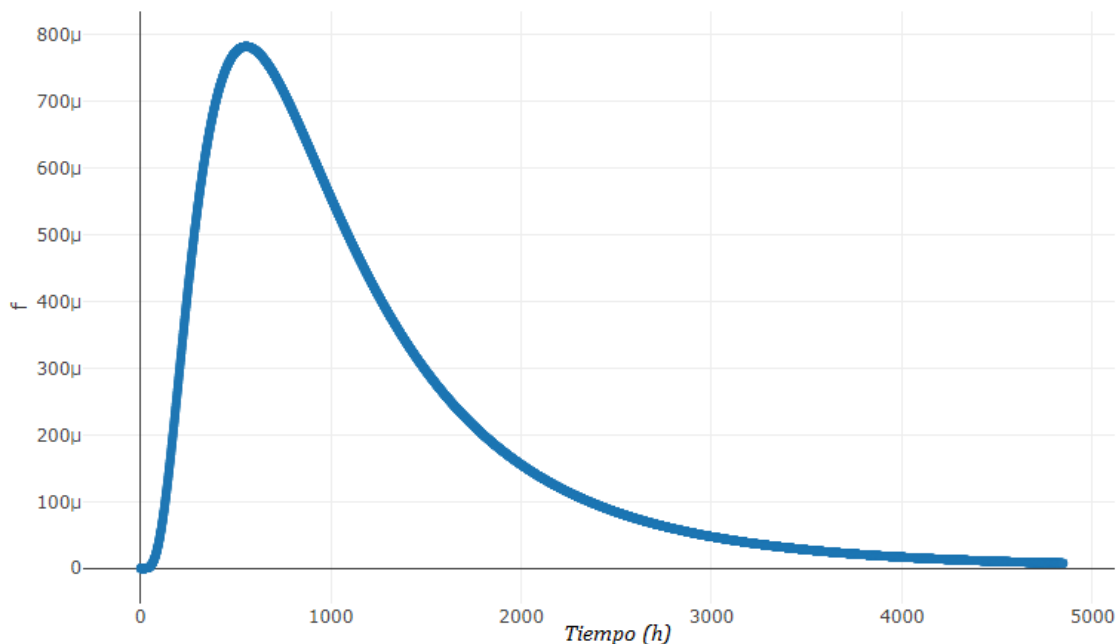


Figura 30 – Función densidad probabilidad log normal

### 7.2.3.2 Función de Probabilidad de falla (Desconfiabilidad) Log Normal F(t)

Sustituyendo los valores en la función de desconfiabilidad Log normal para  $\mu$  (ln) y  $\sigma$  (ln), y graficando la ecuación.

$$\mu_{\ln(x)} = 6.82761$$

$$\sigma_{\ln(x)} = 0,7129$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^t e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2}$$

$$F(t) = \frac{1}{(0.7129\sqrt{2\pi})t} \int_{\infty}^t e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - 6.82761}{0.7129} \right)^2}$$

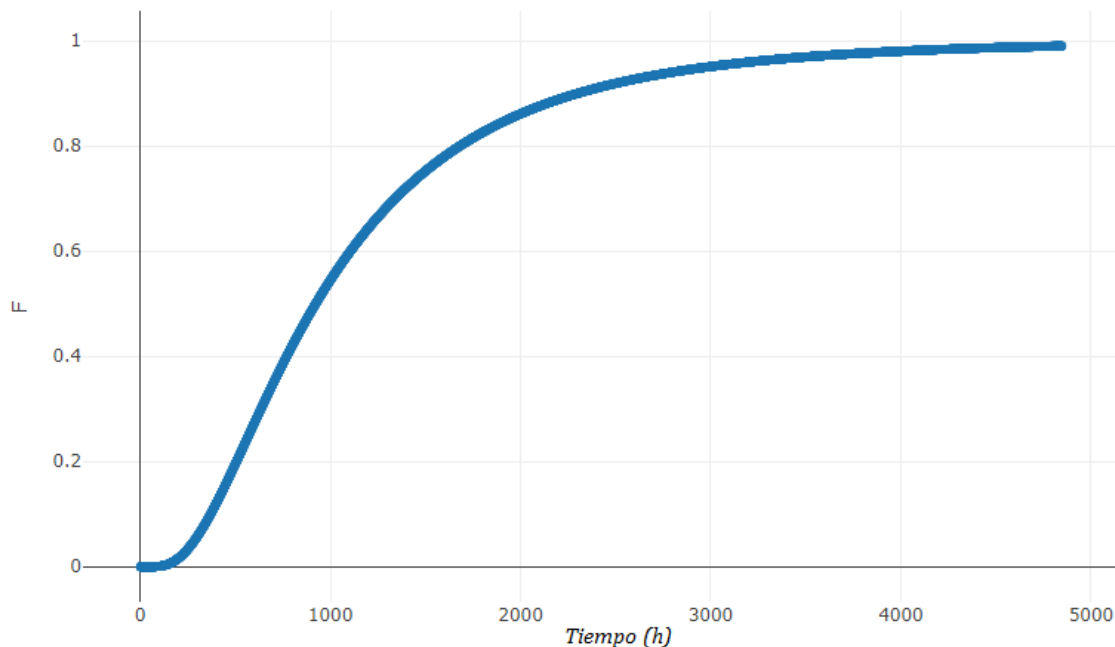


Figura 31 - PDF y Boxplot de Fallas

### 7.2.3.3 Función de Confiabilidad Log Normal R(t)

Sustituyendo los valores en la función Confiabilidad Log normal para  $\mu$  (ln) y  $\sigma$  (ln), y graficando la ecuación.



$$\mu_{\ln(x)} = 6.82761$$

$$\sigma_{\ln(x)} = 0,7129$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$R(t) = 1 - \frac{1}{(0.7129\sqrt{2\pi})t} \int_{\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-6.82761}{0.7129}\right)^2}$$

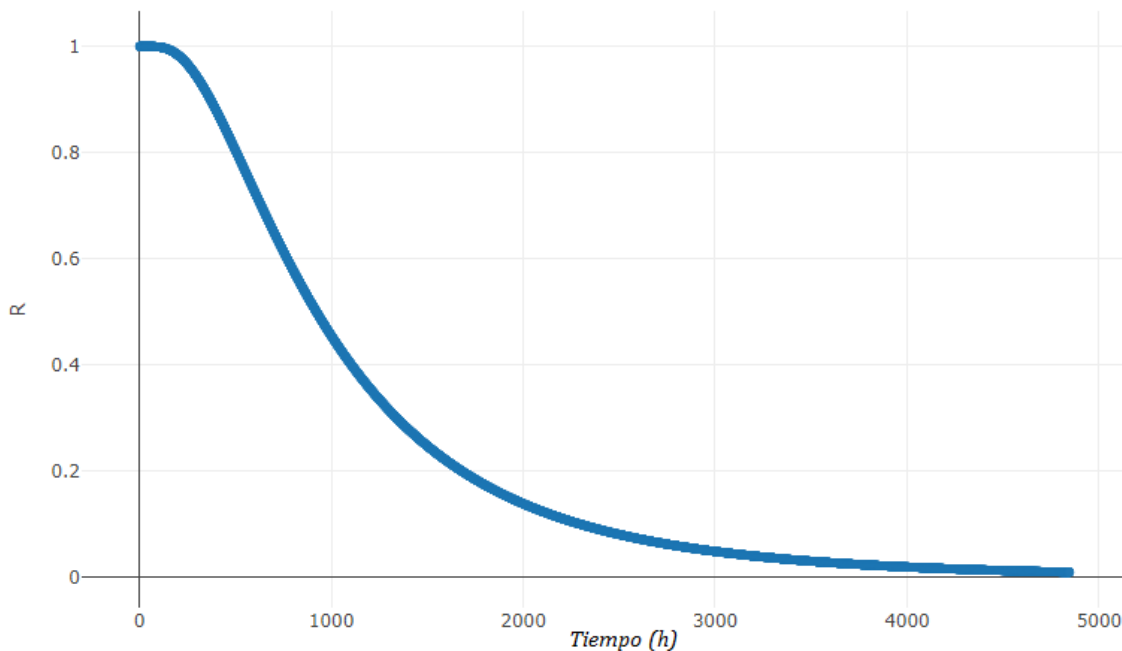


Figura 32 – Confiabilidad log normal

#### 7.2.3.4 Función Hazard o Tasa de riesgo Log Normal $h(t)$ .

Sustituyendo los valores en la función de tasa de riesgo Log normal para  $\mu$  ( $\ln$ ) y  $\sigma$  ( $\ln$ ), y graficando la ecuación.

$$\mu_{\ln(x)} = 6.82761$$

$$\sigma_{\ln(x)} = 0,7129$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

$$h(t) = \frac{\frac{1}{(0.7129\sqrt{2\pi})t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-6.82761}{0.7129}\right)^2}}{1 - \frac{1}{(0.7129\sqrt{2\pi})t} \int_{\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-6.82761}{0.7129}\right)^2}}$$

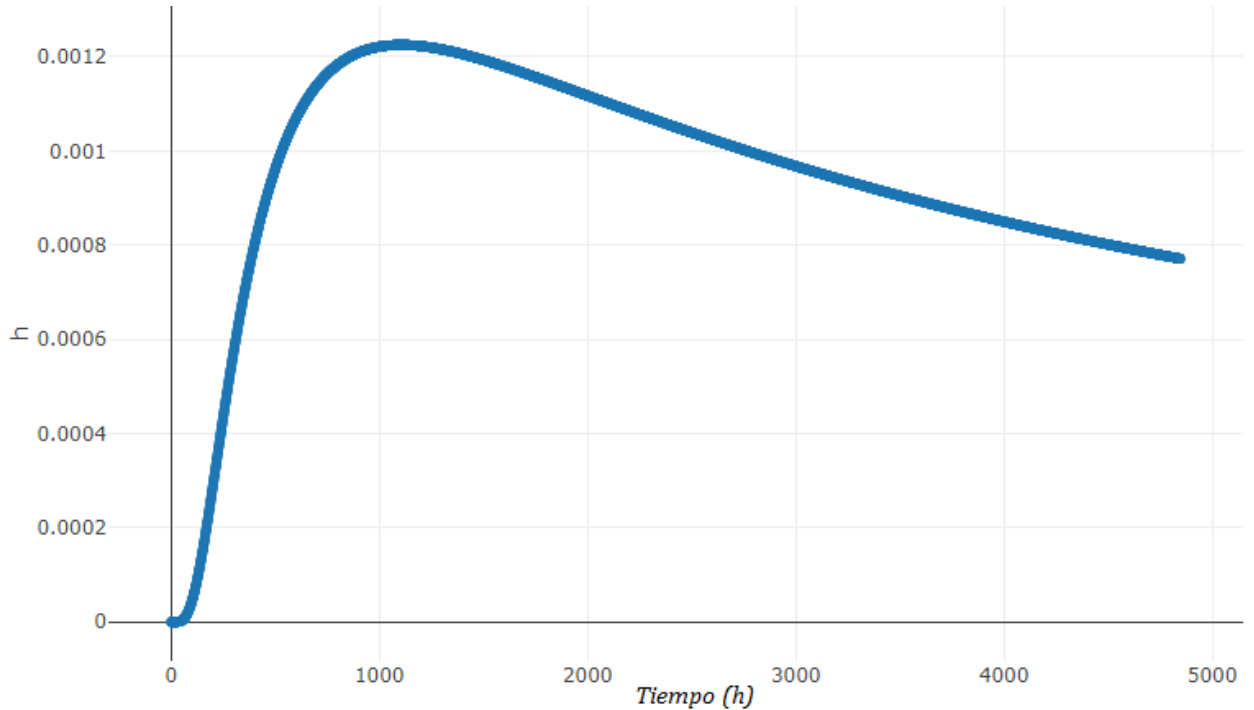


Figura 33 – Función Hazard

### 7.2.3.5 MTBF Tiempo medio entre fallas Log Normal

De la tabla 2 se identifica la ecuación que representa el tiempo medio entre fallas para una distribución Log Normal con valores  $\mu (\ln)$  y  $\sigma (\ln)$ .

$$\mu_{\ln(x)} = 6.82761$$

$$\sigma_{\ln(x)} = 0,7129$$

$$MTBF = e^{\left(\mu_{\ln(x)} + \frac{\sigma_{\ln(x)}^2}{2}\right)}$$

$$MTBF = e^{\left(6.82761 + \frac{0,7129^2}{2}\right)}$$

$$MTBF = 1190.017 h$$

MTBF representada en cada una de las funciones.

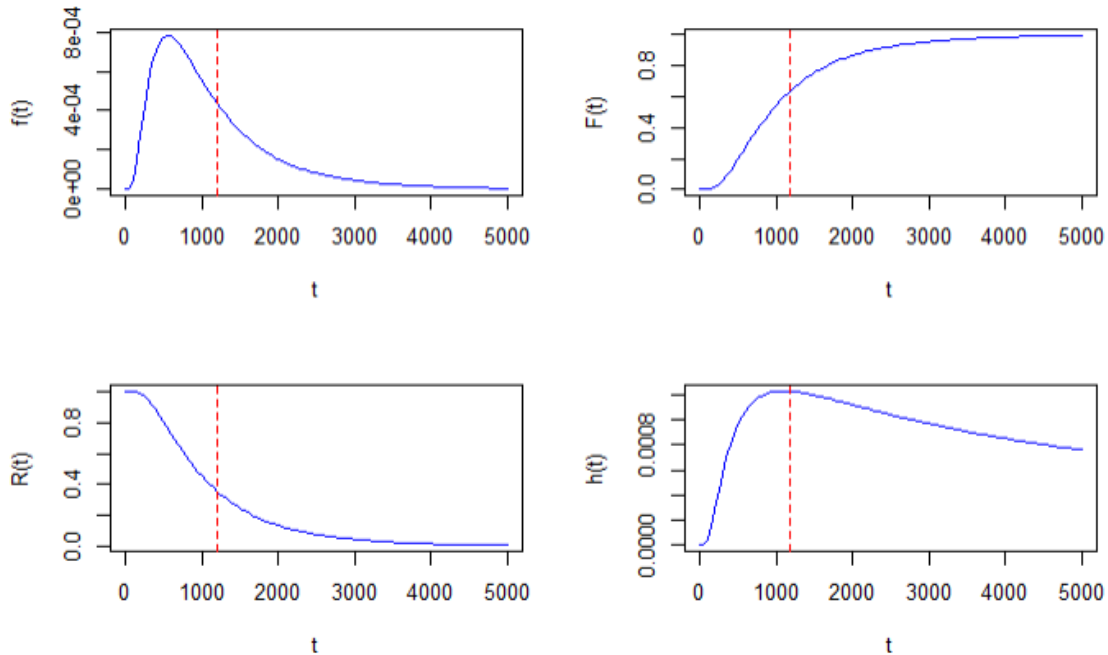


Figura 34 - MTBF por funciones

### 7.2.4 Pruebas de Bondad de Ajuste

Las tres distribuciones de confiabilidad intentan de forma teórica representar el comportamiento de las fallas en el tiempo de los Manlift, lo que debemos determinar es en verdad cual es ellas es la que mejor se aproxima a los datos observados, se plantea realizar tres pruebas de bondad de ajuste; Prueba de chi-cuadrado y Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

#### 7.2.4.1 Prueba Chi Cuadrado

Para determinar el valor Chi Cuadrado se tienen hipótesis nulas (Se acepta que los valores de las distribuciones Normal, Weibull 2P y Log Normal, se comportan como los valores observados) las cuales se deben enfrentar a la hipótesis alternativa (No se acepta que los valores de las distribuciones Normal Weibull 2P y Log Normal, se comportan como los valores

observados), para ello se emplea la ecuación de Chi Cuadrado, la cual busca determinar el valor de la suma del cuadrado de las sumas de los valores observados (Rango Medios en este caso (BM)) y los valores teóricos demostrados en las tres distribuciones de confiabilidad, se toma como valor de aceptación, con un nivel de significancia del 5% (0.05).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\text{Observado}_i - \text{Teorico}_i)^2}{\text{Teorico}_i}$$

$$\chi_{Normal}^2 = \chi_{0.05,(44-1-1)}^2 = 0,16456$$

$$\chi_{Weibull\ 2P}^2 = \chi_{0.05,(44-1-1)}^2 = 0,33073$$

$$\chi_{Log\ Normal}^2 = \chi_{0.05,(44-1-1)}^2 = 1,75714$$

Los valores Chi cuadrado de las hipótesis nulas se enfrentan a los valores por tabla teóricos.

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05
30	59,7022	56,3325	53,6719	50,8922	46,9792	43,7730
31	61,0980	57,6921	55,0025	52,1914	48,2319	44,9853
32	62,4873	59,0461	56,3280	53,4857	49,4804	46,1942
33	63,8694	60,3953	57,6483	54,7754	50,7251	47,3999
34	65,2471	61,7382	58,9637	56,0609	51,9660	48,6024
35	66,6192	63,0760	60,2746	57,3420	53,2033	49,8018
36	67,9850	64,4097	61,5811	58,6192	54,4373	50,9985
37	69,3476	65,7384	62,8832	59,8926	55,6680	52,1923
38	70,7039	67,0628	64,1812	61,1620	56,8955	53,3835
39	72,0550	68,3830	65,4753	62,4281	58,1201	54,5722
40	73,4029	69,6987	66,7660	63,6908	59,3417	55,7585
45	80,0776	76,2229	73,1660	69,9569	65,4101	61,6562

Tabla 8 – Valores chi cuadrado

Las hipótesis nulas al ser valores menores a los teóricos por tablas, se aceptan, es decir que las tres distribuciones describen el comportamiento de las fallas, pero la distribución normal al tener el menor de los valores, es la que mejor aproximación tiene a las horas de falla observadas.

i	BM	Normal	$\chi^2$ Normal	Weibull2P	$\chi^2$ Weibull	Log.Normal	$\chi^2$ Log Normal
1	0.01576577	0.03529271	1.080398e-02	0.01951737	7.211271e-04	0.002267013	8.037726e-02
2	0.03828629	0.03601160	1.439348e-04	0.02085228	1.457943e-02	0.002700741	4.689356e-01
3	0.06081081	0.03947449	1.153248e-02	0.02741499	4.068141e-02	0.005407930	5.675885e-01
4	0.08333333	0.06351925	6.180771e-03	0.07381285	1.227964e-03	0.045198867	3.217420e-02
5	0.10585586	0.09957866	3.956995e-04	0.13665649	6.942072e-03	0.126093423	3.248061e-03
6	0.12837638	0.11873789	7.827237e-04	0.16640765	8.690858e-03	0.167360473	9.079824e-03
7	0.15090090	0.11946729	8.270651e-03	0.16749673	1.644340e-03	0.168876245	1.913312e-03
8	0.17342342	0.13274555	1.246512e-02	0.18681454	9.598933e-04	0.195712841	2.538506e-03
9	0.19594595	0.14912480	1.470057e-02	0.20942309	8.673043e-04	0.226840443	4.207671e-03
10	0.21846847	0.16956496	1.410405e-02	0.23598749	1.300562e-03	0.262770180	7.469042e-03
11	0.24099099	0.20291458	7.144945e-03	0.27604730	4.451935e-03	0.315228731	1.748331e-02
12	0.26351351	0.21556229	1.066661e-02	0.29033601	2.477978e-03	0.333376940	1.464078e-02
13	0.28603604	0.25085468	4.934044e-03	0.32802241	5.374193e-03	0.379744201	2.312404e-02
14	0.30855856	0.32370413	7.086361e-04	0.39782466	2.003002e-02	0.459863830	4.978275e-02
15	0.33108108	0.38919517	8.677515e-03	0.45391955	3.324221e-02	0.519071585	6.808392e-02
16	0.35360360	0.39271361	3.894932e-03	0.45679524	2.331135e-02	0.521989790	5.431889e-02
17	0.37612613	0.40048474	1.481560e-03	0.46310309	1.633544e-02	0.528352394	4.385868e-02
18	0.39864865	0.40829547	2.279260e-04	0.46938449	1.065983e-02	0.534636224	3.458917e-02
19	0.42117117	0.44132003	9.199145e-04	0.49534454	1.110679e-02	0.560068035	3.444642e-02
20	0.44369369	0.44132003	1.276683e-05	0.49534454	5.385766e-03	0.560068035	2.418097e-02
21	0.46621622	0.46236701	3.204457e-05	0.51143470	3.997992e-03	0.575409240	2.072111e-02
22	0.48873874	0.52663499	2.726986e-03	0.55878931	8.781632e-03	0.618800834	2.733698e-02
23	0.51126126	0.57806359	7.719828e-03	0.59521054	1.184032e-02	0.650518036	2.981078e-02
24	0.53378378	0.61565172	1.088661e-02	0.62126788	1.231911e-02	0.672403592	2.857726e-02
25	0.55630631	0.62819275	8.226234e-03	0.62988850	8.595711e-03	0.679505316	2.233683e-02
26	0.57882883	0.62819275	3.879058e-03	0.62988850	4.138971e-03	0.679505316	1.491637e-02
27	0.60135135	0.63441355	1.723023e-03	0.63415444	1.696815e-03	0.682995071	9.759510e-03
28	0.62387387	0.65556255	1.531771e-03	0.64861928	9.440596e-04	0.694710337	7.222873e-03
29	0.64639640	0.65556255	1.281621e-04	0.64861928	7.618068e-06	0.694710337	3.360015e-03
30	0.66891892	0.65893062	1.514062e-04	0.65091882	4.977632e-04	0.696556388	1.096580e-03
31	0.69144144	0.65960273	1.536840e-03	0.65137761	2.464179e-03	0.696924169	4.313282e-05
32	0.71396396	0.67689434	2.030091e-03	0.66317399	3.889811e-03	0.706321350	8.269543e-05
33	0.73648649	0.70781268	1.161589e-03	0.68427790	3.983377e-03	0.722859235	2.568992e-04
34	0.75900901	0.73187214	1.006200e-03	0.70077440	4.839317e-03	0.735556842	7.477385e-04
35	0.78153153	0.76118659	5.437779e-04	0.72106481	5.070590e-03	0.750920221	1.247872e-03
36	0.80405405	0.77073883	1.440052e-03	0.72774332	8.001899e-03	0.755919817	3.065014e-03
37	0.82657658	0.81022936	3.298219e-04	0.75587691	6.612773e-03	0.776701140	3.202724e-03
38	0.84909910	0.85379681	2.584746e-05	0.78843529	4.667597e-03	0.800273077	2.978959e-03
39	0.87162162	0.86956482	4.865020e-06	0.80082612	6.258540e-03	0.809139499	4.824898e-03
40	0.89414414	0.92370075	9.457533e-04	0.84775587	2.538316e-03	0.842445820	3.172568e-03
41	0.91666667	0.93759364	4.670874e-04	0.86161639	3.517265e-03	0.852279368	4.864278e-03
42	0.93918919	0.93893312	6.983491e-08	0.86301488	6.723551e-03	0.853273664	8.650774e-03
43	0.96171171	0.95956444	4.805091e-06	0.88650546	6.380086e-03	0.870085031	9.648998e-03
44	0.98423423	0.98782322	1.303960e-05	0.93158414	2.975611e-03	0.903725244	7.172199e-03

Tabla 9 – Valores chi cuadrado resultantes

### 7.2.4.2 Prueba Kolmogorov-Smirnov

El estadístico K - S utilizado en la prueba de Kolmogorov - Smirnov para medir la diferencia máxima entre  $S_n(t)$  y una hipotética  $F(t)$ , se introduce como: (Modarres et al., 2017)

$$K - S = \text{Max} [|F_{(t_1)} - S_n(t_1)|, |F_{(t_1)} - S_n(t_{i-1})|]$$

Se debe calcular y seleccionar el valor máximo de las diferencias entre el valor de las distribuciones que serían las hipótesis nulas y el valor de las observaciones (Los valores del Rango medio (BM)), o sea la hipótesis alternativa. Corresponderá a la distribución los valores que se ajusten a un nivel de significancia del 5% (0.05).

$$K - S_{44,0.05,Max Normal} = 0,10439$$

$$K - S_{44,0.05,Max Weibull 2P} = 0,90906$$

$$K - S_{44,0.005,Max Log Normal} = 0,21051$$

<i>n</i>	0.20	0.10	0.05
40	0.16547	0.18913	0.21012
41	0.16349	0.18687	0.20760
42	0.16158	0.18468	0.20517
43	0.15974	0.18257	0.20283
44	0.15795	0.18051	0.20056
45	0.15623	0.17856	0.19837
46	0.15457	0.17665	0.19625
47	0.15295	0.17481	0.19420
48	0.15139	0.17301	0.19221
49	0.14987	0.17128	0.19028
50	0.14840	0.16959	0.18841
<i>n</i> > 50	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$

Tabla 10 – Pruebas Kolmogorov-Smirnov

De acuerdo al valor de la tabla K-S con un valor *n* de 44 y un nivel de significancia de 0.05, se concluye que los valores K-S de las distribuciones Weibull2P y Log normal deben ser

rechazados dado que son mayores a 0.20056 por ende no se ajustan a los datos observados. La distribución normal presenta un valor K-S menor que al valor de tablas, por ende, no se rechaza la hipótesis, es decir que esta distribución se ajusta a los valores observados.

i	BM	Normal	K-S Normal	K-S Normal i-1	Weibull2P	K-SWeibull2P	K-SWeibull2P i-1	Log.Normal	K-S Log.Normal	K-S Log.Normal i-1
1	1.57657657657657...	0.03529271	0.019526946	NA	0.01951737	0.003751600	NA	0.002267013	0.013498753	NA
2	3.82882882882882...	0.03601160	0.002276691	0.020245832	0.02085228	0.017436006	0.001670241	0.002700741	0.035587548	0.013065025
3	6.08108108108108...	0.03947449	0.021336323	0.001186199	0.02741499	0.033395818	0.004892470	0.005407930	0.055402880	0.032880358
4	8.33333333333333...	0.06351925	0.019814084	0.002708439	0.07381285	0.009520480	0.051290331	0.045198867	0.038134467	0.015611944
5	0.10585585585585...	0.09957866	0.006277199	0.016245323	0.13665649	0.030800636	0.052532697	0.126093423	0.020237567	0.042760089
6	0.12837837837837...	0.11873789	0.009640486	0.012862037	0.16640765	0.038029267	0.067826589	0.167360473	0.038982095	0.061504617
7	0.15090909090909...	0.11946729	0.031433616	0.008911093	0.16749673	0.016595830	0.111782549	0.168876245	0.017975344	0.040497867
8	0.17342342342342...	0.13274555	0.040677877	0.018155354	0.18681454	0.013391117	0.137509783	0.195712841	0.022289417	0.044811940
9	0.19594594594594...	0.14912480	0.046821148	0.024298625	0.20942309	0.013477149	0.159946274	0.226840443	0.030894497	0.053417020
10	0.21846846846846...	0.16956496	0.048903509	0.026380986	0.23598749	0.017519026	0.178426920	0.262770180	0.044301711	0.066824234
11	0.24099099099099...	0.20291458	0.038076416	0.015553893	0.27604730	0.035056307	0.183412162	0.315228731	0.074237740	0.096760263
12	0.26351351351351...	0.21556229	0.047951220	0.025428697	0.29033601	0.026822493	0.214168498	0.333376940	0.069863426	0.092385949
13	0.28603603603603...	0.25085468	0.035181357	0.012658835	0.32802241	0.041986374	0.221527140	0.379744201	0.093708165	0.116230687
14	0.30855855855855...	0.32370413	0.015145575	0.037668097	0.39782466	0.089266104	0.196769932	0.459863830	0.151305272	0.173827794
15	0.33108108108108...	0.38919517	0.058114087	0.080636609	0.45391955	0.122838473	0.185720086	0.519071585	0.187990504	0.210513027
16	0.35360360360360...	0.39271361	0.039110010	0.061632532	0.45679524	0.103191632	0.227889449	0.521989790	0.168386186	0.190908709
17	0.37612612612612...	0.40048474	0.024358618	0.046881140	0.46310309	0.086976963	0.266626641	0.528352394	0.152226268	0.174748791
18	0.39864864864864...	0.40829547	0.009646821	0.032169344	0.46938449	0.070735846	0.305390280	0.534636224	0.135987576	0.158510098
19	0.42117117117117...	0.44132003	0.020148864	0.042671386	0.49534454	0.074173368	0.324475281	0.560068035	0.138896864	0.161419387
20	0.44369369369369...	0.44132003	0.002373659	0.020148864	0.49534454	0.051650845	0.369520326	0.560068035	0.116374342	0.138896864
21	0.46621621621621...	0.46236701	0.003849201	0.018673321	0.51143470	0.045218488	0.398475205	0.575409240	0.109193024	0.131715547
22	0.48873873873873...	0.52663499	0.037896254	0.060418777	0.55878931	0.070050568	0.396165648	0.618800834	0.130062095	0.152584618
23	0.51126126126126...	0.57806359	0.066802330	0.089324852	0.59521054	0.083949281	0.404789458	0.650518036	0.139256774	0.161779297
24	0.53378378378378...	0.61565172	0.081867931	0.104390454	0.62126788	0.087484096	0.423777165	0.672403592	0.138619808	0.161142331
25	0.55630630630630...	0.62819275	0.071886440	0.094408962	0.62988850	0.073582194	0.460201590	0.679505316	0.123199010	0.145721533
26	0.57882882882882...	0.62819275	0.049363917	0.071886440	0.62988850	0.051059671	0.505246635	0.679505316	0.100676488	0.123199010
27	0.60135135135135...	0.63441355	0.033062197	0.055584720	0.63415444	0.032803092	0.546025737	0.682995071	0.081643720	0.104166242
28	0.62387387387387...	0.65556255	0.031688672	0.054211194	0.64861928	0.024745409	0.576605942	0.694710337	0.070836463	0.093358986
29	0.64639639639639...	0.65556255	0.009166149	0.031688672	0.64861928	0.002222887	0.621650987	0.694710337	0.048313941	0.070836463
30	0.66891891891891...	0.65893062	0.009988301	0.012534221	0.65091882	0.018000096	0.628396300	0.696556388	0.027637469	0.050159992
31	0.69144144144144...	0.65960273	0.031838716	0.009316194	0.65137761	0.040063834	0.628855085	0.696924169	0.005482728	0.028005250
32	0.71396396396396...	0.67689434	0.037069628	0.014547105	0.66317399	0.050789976	0.640651466	0.706321350	0.007642614	0.014879909
33	0.73648648648648...	0.70781268	0.028673806	0.006151284	0.68427790	0.052208590	0.661755374	0.722859235	0.013627251	0.008895271
34	0.75900909090909...	0.73187214	0.027136865	0.004614342	0.70077440	0.058234606	0.678251881	0.735556842	0.023452167	0.000929645
35	0.78153153153153...	0.76118659	0.020344937	0.002177585	0.72106481	0.060466718	0.698542291	0.750920221	0.030611311	0.008088788
36	0.80405050505050...	0.77073883	0.033315226	0.010792704	0.72774332	0.076310737	0.705220794	0.755919817	0.048134237	0.025611714
37	0.82657657657657...	0.81022936	0.016347214	0.006175309	0.75587691	0.070699664	0.733354390	0.776701140	0.049875437	0.027352914
38	0.84909909909909...	0.85379681	0.004697710	0.027220233	0.78843529	0.060663814	0.765912763	0.800273077	0.048826022	0.026303500
39	0.87162162162162...	0.86956482	0.002056806	0.020465717	0.80082612	0.070795499	0.778303600	0.809139499	0.062482123	0.039959600
40	0.89414414414414...	0.92370075	0.029556608	0.052079130	0.84775587	0.046388274	0.825233348	0.842445820	0.051698324	0.029175801
41	0.91666666666666...	0.93759364	0.020926973	0.043449495	0.86161639	0.055050280	0.839093864	0.852279368	0.064387298	0.041864776
42	0.93918918918918...	0.93893312	0.000256067	0.022266456	0.86301488	0.076174305	0.840492362	0.853273664	0.085915525	0.063393002
43	0.96171171171171...	0.95956444	0.002147276	0.020375247	0.88650546	0.075206257	0.863982933	0.870085031	0.091626680	0.069104158
44	0.98423423423423...	0.98782322	0.003588986	0.026111509	0.93158414	0.052650092	0.909061620	0.903725244	0.080508990	0.057986468
NA	MAX	NA	NA	0.104390454	NA	NA	0.909061620	NA	NA	0.210513027

Tabla 11 – Resultante datos de las tres pruebas realizadas (Normal, Weibull y Log Normal)



Graficando las curvas de densidad (PDF) y la confiabilidad de las tres distribuciones estudiadas y comparándolas con los datos observados, se observa que el ajuste que proporciona la distribución normal (curva roja) es la más cercana a los datos reales tal como se comprobó con la prueba de bondad de ajuste K-S.

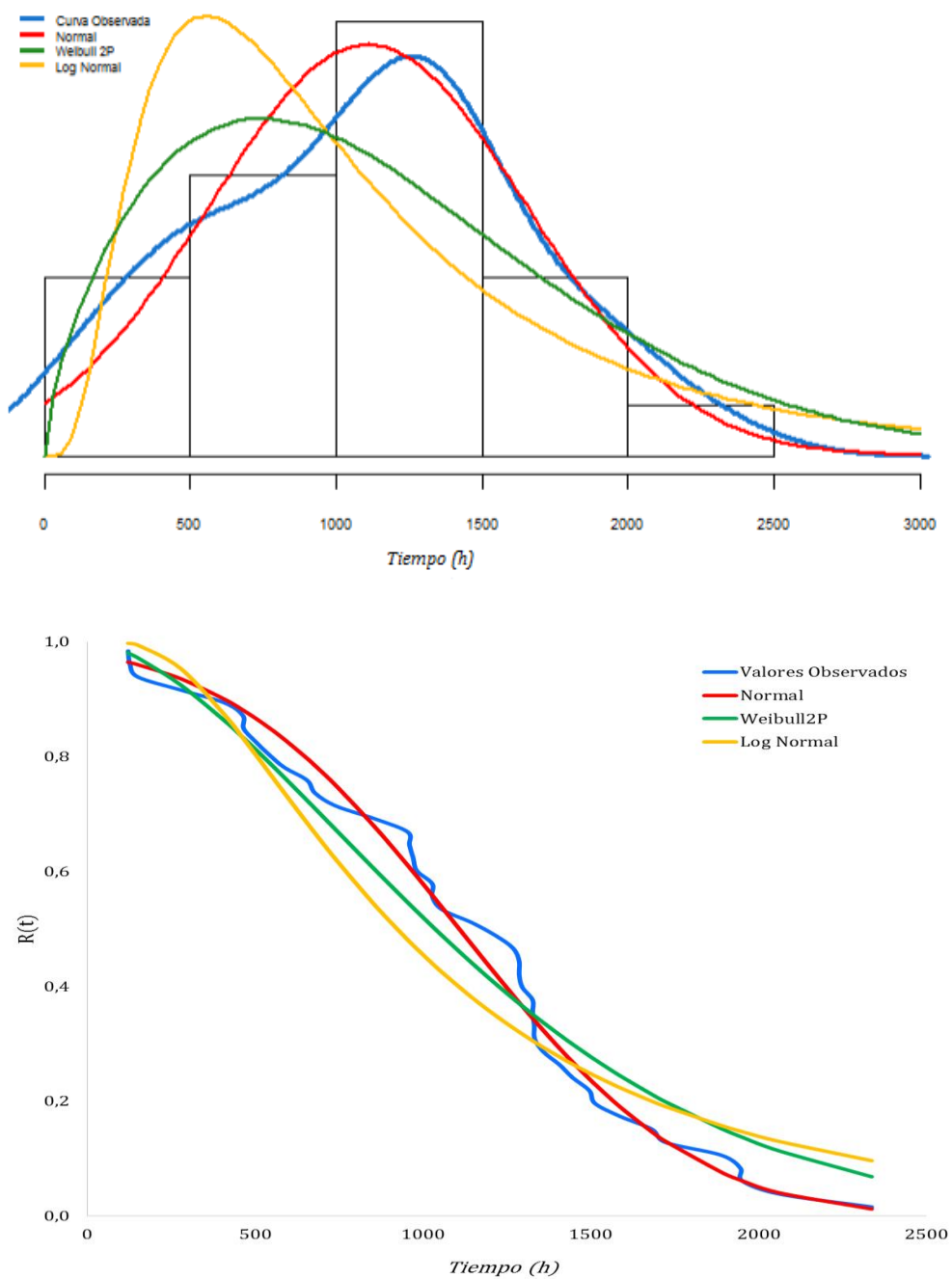


Figura 35 – Grafica de las 3 pruebas realizadas vs curva de datos reales

### **7.3 Análisis financiero basado en resultado estadístico**

Para poder realizar un análisis financiero que sea de utilidad para la presente investigación se determina como base los resultados arrojados por el proceso estadístico. Se quiere por lo tanto contrastar lo arrojado en cuanto al modelo de determinación del comportamiento de los datos vs lo obtenido al realizar una organización de los datos de las fallas.

Las fallas que se pueden extraer de todas las hojas de vida se organizarán de varias maneras:

1. Primero se organizarán por horómetro como se hizo inicialmente para el desarrollo del análisis estadístico.
2. Posteriormente se agruparán los datos por similitud de especialidad en la intervención, es decir, si las fallas son eléctricas o hidráulicas principalmente.
3. Se organizarán por costo asociado a la intervención de la falla, que incluye la mano de obra y costo en repuestos.

Lo que se quiere con esta organización es comparar los datos de las fallas en cada ítem descrito previamente y lo obtenido por el análisis estadístico. Del análisis estadístico se extrajo elementos clave numéricos y una determinación de rangos de horómetro de fallas importante, además de la determinación del indicador MTBF. Con esto se busca tomar acciones de mantenimiento en las fallas. Estas al indicar los costos asociados a cada una, permitirá realizar un análisis de tipo financiero en estas decisiones a tomar.

### 7.3.1. Datos clave

Como datos clave estadísticos para la comparación se tiene lo siguiente:

- Primer horómetro de falla: 122 horas
- Último horómetro de falla: 2337 horas
- MTBF (de distribución normal): 1180 horas
- Rango donde se concentran más las fallas: de 667 a 1436 horas
- Horómetro siguiente al máximo con alta probabilidad de falla: 2900 horas
- Valor beta: 1.664

### 7.3.2. Organización de datos

A continuación, se presenta la primera tabla con los datos organizados por horómetro, se incluye una columna que describe la naturaleza de la intervención y se destaca el costo de cada una:

Especialidad	OT	Fecha Documento	Trabajos	Técnico	Horómetro	Duración	Valor M.C	Valor Repuest	Total Mitto
HIDRAULICO	OTE-4887	14/02/2017	Se realiza cambio de una manguera del sistema hidráulico por estar averiada equipo queda operativo.	SAMIR ARGUMEDO	122	8	\$ 97,256	\$ 90,000	\$ 187,256
ELECTRICO	OTE-5304	29/11/2017	encuentra breaker saltado, apagado. se verifica equipo que no funciona electricamente, encontrando breaker apagado debido posiblemente a una sobrecarga y se salta breaker, se activo breaker, se conecta extensión y se prueba	ANDRES RESTREPO PARRA	127	5	\$ 50,570	\$ -	\$ 50,570
ELECTRICO	OTE-7033	30/12/2019	descargada posible falla un Switch abierto o batería fallando, se hacen pruebas de elevación y descenso, se pone a cargar la	Jhon Jairo Quintana Gonzalez	150	4	\$ 25,141	\$ -	\$ 25,141
HIDRAULICO	OTT-2737	12/02/2020	se pide gato empaquetado se realiza instalacion se realizan pruebas del gato queda en buenas condiciones para trabajar. Se realiza desmonte de control se realiza desarmado y se encuentra que los micros no ajustan bien y al oprimir el hongo del control se salen y no actua la parada de emergencia, se instalan abrazaderas plásticas para fijar los micros y se realizan pruebas queda funcionando bien el hongo en buenas	Juan Manuel Mendez Quete	276	2	\$ 13,166	\$ 458,177	\$ 471,343
HIDRAULICO	OTE-4972	21/04/2017	Se cambian manguera hidráulica se suministra 5 galones de aceite equipo queda operativo.	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	408	2	\$ 26,478	\$ -	\$ 26,478
HIDRAULICO	OTE-4984	02/05/2017	Se realiza inspección general se ajustan mang	SAMIR ARGUMEDO	464	1	\$ 12,157	\$ -	\$ 12,157
HIDRAULICO	OTT-1749	04/08/2018	Se enderezo protector frontal de los mandos de la canasta. Se le revisa nivel de aceite de motor. Engrase general. Lavado general.	Victor Andres Gutierrez	466	7	\$ 74,558	\$ 377,211	\$ 451,769

ELECTRICO	OTE-5002	09/05/2017	inspeccion general cambio de burbuja nivelador de la maquina se coloca completamente nuevo equipo operativo.	SAMIR ARGUMEDO	501	3	\$ 32,419	\$ -	\$ 32,419
HIDRAULICO	OTE-7282	09/10/2020	no sube se calibra válvula y equipo queda probado y funcionando en buenas	ANDRES RESTREPO PARRA	541	1	\$ 10,114	\$ -	\$ 10,114
INSPECCIÓN	OTE-5035	05/06/2017	Se realiza mantenimiento preventivo, cambio de filtros, aceite, revision electrica general.	Dairo Miguel Cardales Julio	587	3	\$ 36,471	\$ 103,899	\$ 140,370
HIDRAULICO	OTE-5080	13/07/2017	Se realiza calibración de válvula de retención en cilindro, se desmonta control mecánico de válvula para cambio do arreglo.	Javier Mardoqueo Bernal	655	4	\$ 52,956	\$ -	\$ 52,956
HIDRAULICO	OTE-6065	08/11/2018	El equipo se encuentra operativo. Diagnostico: presenta fuga de hidraulico por valvula de control Trabajo: Se cambia orings de valvula de mando de operacion tierra, se	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	679	1	\$ 13,239	\$ -	\$ 13,239
ELECTRICO	OTT-1902	23/11/2018	Trabajo: Cambio de aceite del motor, filtros, arreglo del control remoto traccion.	Orlando Vargas Romero	742	1	\$ 13,958	\$ 94,448	\$ 108,406
HIDRAULICO	OTT-1937	23/11/2018	Mantenimiento cilindros trances 170	Orlando Vargas Romero	859	11	\$ 129,140	\$ 917,601	\$ 1,046,741
MECÁNICO	OTE-5118	01/08/2017	el equipo se encuentra parado por fuga de combustible, el empaque se encuentra dañado por desgaste normal, se realiza un montaje de palanca de mando de extencion	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	955	5	\$ 66,195	\$ 15,000	\$ 81,195
HIDRAULICO	OTE-7487	03/03/2021	El equipo se encuentra con ACPM en el tanque hidráulico por este motivo el aceite hidráulico fue contaminado y no se pudo poner en marcha el equipo quedando fuera de servicio Nota se le cambia aceite hidráulico y también se le cambió filtro hidráulico se gastaron 8 galones de aceite hidráulico referencia ISO VG 32 se lava el tanque y se hacen pruebas el equipo se entrega probado y funcionando en buenas condiciones La visita y los insumos gastados serán	SAMIR ARGUMEDO	960	2	\$ 24,314	\$ 279,091	\$ 303,405
HIDRAULICO	OTE-6390	06/04/2019	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE EQUIPO: equipo que presenta fuga de hidráulica por el bloque se revisa y se encuentra que a una de las válvulas . DIAGNOSTICO faltan dos (2) tornillos para asegurarlas y por allí es por donde presenta la fuga ademas la válvula se encontraba puesta al revés.	ANDRES RESTREPO PARRA	971	4	\$ 40,456	\$ -	\$ 40,456
ELECTRICO	OTE-6391	08/04/2019	DESCRIPCIÓN ESTADO DEL EQUIPO:Equipo que se encuentra bloqueado no se se desplaza se revisa las pachas, se revisa fusible , se revisa control . DIAGNOSTICO : Se pone en modo emergencia , se sube un poco el brazo y vuelve y se pone en su sitio , se calibra	ANDRES RESTREPO PARRA	982	3	\$ 30,342	\$ -	\$ 30,342
HIDRAULICO	OTE-6411	15/04/2019	DESCRIPCION DEL ESTADO DEL EQUIPO : El equipo s encuentra con la canasta atorada contra la estructura . DIAGNOSTICO: El equipo se encuentra operativo . DESCRIPCIÓN DE LA FALLA:Se encontró manipuladas las válvulas del bloque hidráulico principal presenta bajo nivel de aceite de motor . CAUSA PROBABLE DE LA FALLA: Se encuentra equipo atorado por mala operación del personal a cargo .	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	1028	3	\$ 39,717	\$ -	\$ 39,717
MECÁNICO	OTE-6433	29/04/2019	motor bajo se encuentra operativo goteo tapón dengue aceite TRABAJO REALIZADO : mantenimiento preventivo REPUESTOS A UTILIZAR : Filtros y aceite .	luis gabriel martinez castillo	1028	1	\$ 4,858	\$ -	\$ 4,858
INSPECCIÓN	OTE-5162	09/10/2017	Se realiza mantenimiento preventivo, cambio de filtros, aceite, revision electrica general. Se entrega el equipo probado y funcionando	Javier Mardoqueo Bernal Arteaga	1057	3	\$ 39,717	\$ 52,143	\$ 91,860

Tabla 14 - Datos organizados por horómetro

De las 44 fallas se obtiene lo siguiente:

- La mayoría de fallas e intervenciones son de tipo **hidráulico**
- Las fallas más costosas son de tipo **hidráulico**
- Las fallas en las cuales se tardó más en intervenir son de tipo **hidráulico**
- Las fallas con frecuencias más irregulares son de tipo **eléctrico**

Con la primera organización de los datos se realizará una tabla de inversión vs costo para ajustar teóricamente la mano de obra que se usaría y el uso de repuestos o mejoras adicionales que evitarían la intervención actual, lo cual nos presentaría como resultado un balance.

### **7.3.3. Tabla de inversión vs costo de acuerdo a horómetro**

En la siguiente tabla se van a manejar dos columnas adicionales, la primera involucra horas de mano de obra adicionales que se implementarían en el mantenimiento preventivo asociado a la falla presentada, es decir, si este valor tiene datos superiores a 0 quiere decir que para evitar esta falla se incrementan las horas en el mantenimiento preventivo, como son diferentes técnicos y diferente nivel de jerarquía las horas/hombre que manejan son diferentes:

**Técnico junior:** \$ 6285 /h

**Técnico senior:** \$ 10114 /h

**Técnico master:** \$ 12157 \$/h

Para efectos prácticos se manejará el promedio de \$ **10000 /h**

La segunda columna adicional involucra los costos de los repuestos preventivos que se usarían teóricamente para evitar el costo real. Estos costos se obtienen del software de mantenimiento usado en la empresa.

i	Trabajos	Horometro	Valor M.O.	Valor Repuesto	Total Mtto	Duración2	Valor M.O preventivo	Repuesto preventivo	Total preventivo
1	Se realiza cambio de una manguera del sistema hidráulico por estar averiada equipo queda operativo.	122	\$ 97,256	\$ 90,000	\$ 187,256	0.5	\$ 5,000.00	\$ 181,200.00	\$ 186,200.00
2	encuentra breaker saltado, apagado. se verifica equipo que no funciona electricamente, encontrando breaker apagado debido posiblemente a una sobrecarga y se salta breaker, se activo breaker, se conecta extension y se prueba	127	\$ 50,570	\$ -	\$ 50,570	1	\$ 10,000.00	\$ -	\$ 10,000.00
3	descargada posible falla un Switch abierto o batería fallando, se hacen pruebas de elevación y descenso, se pone a cargar la se pide gato empaquetado se realiza instalacion se realizan pruebas del gato queda en buenas condiciones para trabajar. Se realiza desmonte de control se realiza desarmado y se encuentra que los micros no ajustan bien y al oprimir el hongo del control se salen y no actua la parada de emergencia, se instalan abrazaderas plásticas para fijar los micros y se realizan pruebas queda funcionando bien el hongo en buenas	150	\$ 25,141	\$ -	\$ 25,141	0.5	\$ 5,000.00	\$ 151,130.00	\$ 156,130.00
4	Se cambian manguera hidráulica se suministra 5 galones de aceite equipo queda operativo.	276	\$ 13,166	\$ 458,177	\$ 471,343	2	\$ 20,000.00		\$ 20,000.00
5	Se realiza inspección general se ajustan mang	408	\$ 26,478	\$ -	\$ 26,478	0.5	\$ 5,000.00	\$ 181,200.00	\$ 186,200.00
6	Se realiza inspección general se ajustan mang	464	\$ 12,157	\$ -	\$ 12,157		\$ -		\$ -
7	Se enderezo protector frontal de los mandos de la canasta. Se le revisa nivel de aceite de motor. Engrase general. Lavado general.	466	\$ 74,558	\$ 377,211	\$ 451,769	1	\$ 10,000.00		\$ 10,000.00
8	inspeccion general cambio de burbuja nivelador de la maquina se coloca completamente nuevo equipo operativo.	501	\$ 32,419	\$ -	\$ 32,419	0.5	\$ 5,000.00		\$ 5,000.00
9	no sube se calibra válvula y equipo queda probado y funcionando en buenas	541	\$ 10,114	\$ -	\$ 10,114	1.5	\$ 15,000.00		\$ 15,000.00
10	Se realiza mantenimiento preventivo, cambio de filtros, aceite, revision electrica general.	587	\$ 36,471	\$ 103,899	\$ 140,370				
11	Se realiza calibración de válvula de retención en cilindro, se desmonta control mecánico de válvula para cambio do arreglo.	655	\$ 52,956	\$ -	\$ 52,956	2	\$ 20,000.00	\$ 243,120.00	\$ 263,120.00
12	El equipo se encuentra operativo. Diagnostico: presenta fuga de hidraulico por valvula de control Trabajo: Se cambia orings de valvula de mando de operacion tierra, se realiza pruebas de funciones. el equipo queda trabajando.	679	\$ 13,239	\$ -	\$ 13,239	2	\$ 20,000.00	\$ 13,239.00	\$ 33,239.00
13	Trabajo: Cambio de aceite del motor, filtros, arreglo del control remoto traccion.	742	\$ 13,958	\$ 94,448	\$ 108,406	3	\$ 30,000.00		\$ 30,000.00
14	Mantenimiento cilindros trances 170	859	\$ 129,140	\$ 917,601	\$ 1,046,741	3	\$ 30,000.00	\$ 400,000.00	\$ 430,000.00

15	el equipo se encuentra parado por fuga de combustible, el empaque se encuentra dañado por desgaste normal, se realiza un montaje de palanca de mando de extencion	955	\$ 66,195	\$ 15,000	\$ 81,195	3	\$ 30,000.00	\$ 110,000.00	\$ 140,000.00
16	El equipo se encuentra con ACPM en el tanque hidráulico por este motivo el aceite hidráulico fue contaminado y no se pudo poner en marcha el equipo quedando fuera de servicio Nota se le cambia aceite hidráulico y también se le cambió filtro hidráulico se gastaron 8 galones de aceite hidráulico referencia ISO VG 32 se lava el tanque y se hacen pruebas el equipo se entrega probado y funcionando en buenas condiciones La visita y los insumos gastados serán	960	\$ 24,314	\$ 279,091	\$ 303,405	3	\$ 30,000.00	\$ 110,000.00	\$ 140,000.00
17	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE EQUIPO: equipo que presenta fuga de hidráulica por el bloque se revisa y se encuentra que a una de las válvulas . DIAGNOSTICO faltan dos (2) tornillos para asegurarlas y por allí es por donde presenta la fuga ademas la válvula se encontraba puesta al revés.	971	\$ 40,456	\$ -	\$ 40,456	2	\$ 20,000.00	\$ 1,500.00	\$ 21,500.00
18	DESCRIPCIÓN ESTADO DEL EQUIPO:Equipo que se encuentra bloqueado no se se desplaza se revisa las pachas, se revisa fusible , se revisa control . DIAGNOSTICO : Se pone en modo emergencia , se sube un poco el brazo y vuelve y se pone en su sitio , se calibra	982	\$ 30,342	\$ -	\$ 30,342	1	\$ 10,000.00		\$ 10,000.00
19	DESCRIPCION DEL ESTADO DEL EQUIPO : El equipo s encuentra con la canasta atorada contra la estructura . DIAGNOSTICO: El equipo se encuentra operativo . DESCRIPCIÓN DE LA FALLA:Se encontró manipuladas las válvulas del bloque hidráulico principal presenta bajo nivel de aceite de motor . CAUSA PROBABLE DE LA FALLA: Se encuentra equipo atorado por mala operación del personal a cargo .	1028	\$ 39,717	\$ -	\$ 39,717		\$ -		\$ -
20	motor bajo se encuentra operativo goteo tapón dengue aceite TRABAJO REALIZADO : mantenimiento preventivo REPUESTOS A UTILIZAR : Filtros y aceite .	1028	\$ 4,858	\$ -	\$ 4,858		\$ -		\$ -
21	Se realiza mantenimiento preventivo, cambio de filtros, aceite, revision electrica general. Se entrega el equipo probado y funcionando	1057	\$ 39,717	\$ 52,143	\$ 91,860		\$ -		\$ -
22	Se realiza equipo de la estructura extensión de 220VAC se ponen prueba el motor eléctrico y a las 2 horas vemos que el motor bota la venta viola. Al equipo se desmonta la base donde se apoya el canasto se baja el motor eléctrico y se desarma el motor eléctrico para mandar el inducido a que le hagan una ranura a la punta del eje para ponerle un pin segger y no me bote el ventilador o la venta viola	1145	\$ 23,480	\$ 80,119	\$ 103,599	1	\$ 10,000.00	\$ 24,360.00	\$ 34,360.00

Tabla 15 - Primeros 22 datos organizados con costo de mano de obra y repuestos preventivos

Se toman los primeros 22 datos ya que el horómetro da justamente antes de las 1180 horas que es el MTBF determinado en el análisis, por lo tanto, se analizará lo que teóricamente se pudo haber hecho de mantenimiento preventivo (columna *Total preventivo*) y se contrastará lo que se gastó actualmente (Columna *Total mtto*).

Lo que hizo para cada una de las 44 fallas fue lo siguiente:

Primera falla:

1. *Cambio de manguera por avería*: El costo total del mantenimiento real que se invirtió en su momento para dejar operativo el equipo fue de **\$187,256 COP**, este costo incluye mano de obra en horas hombre y el valor de la manguera. Para evitar este costo que es correctivo se invertiría media hora más en la revisión del sistema hidráulico en la gama de mantenimiento del equipo (**\$5000 COP** de mano de obra). Si con esta revisión se detecta que las mangueras están desgastadas se procedería a realizar un cambio total de mangueras (**\$181,200 COP**)(Imagen x)

24/10/2020 14:26	03/10/2019 12:34	Manguera Hdca varias ECOMAXI
24/10/2020 14:26	26/11/2019 15:29	Manguera Hdca varias Traccess1
24/10/2020 14:25	09/07/2018 16:55	Manguera Hdca varias Telehandl
24/10/2020 14:23	17/07/2019 07:31	Manguera Hdca varias JLG300

Unificar Agrupar Desagrupar V. Lista Archivos (0)V. Proveedor

Info Básica Tarifas Detalle Inventario Reemplazos Supercedidos

Bodega	Existencia Minima	Existencia Maxima	Costo
Bodega Principal ECO	0	0	\$181,200,000

res\_mensajes,grillaVacía

Aceptar

CATALOGO REPUESTO:  
Manguera Hdca varias  
Traccess170

Figura 37 - Capturas costo de repuesto para primera falla



El costo real fue de **\$187,256 COP** y el costo preventivo arroja **\$186,200 COP**. Aunque en esta primera falla el costo real y el costo preventivo son similares, el costo preventivo asegura que este tipo de falla no vuelva a ocurrir, al menos si la revisión hidráulica se hace correcta y periódicamente.

Este análisis se hizo para cada falla y para efectos prácticos no se pondrá el análisis detallado de cada una. Pero de manera resumida se presenta la tabla con la relación del costo real y lo invertido en mantenimiento:

i	Horómetro	Total Mtto	Total preventivo	Ganancia teórica
1	122	\$ 187,256	\$ 186,200.00	\$ 1,056.00
2	127	\$ 50,570	\$ 10,000.00	\$ 40,570.00
3	150	\$ 25,141	\$ 156,130.00	-\$ 130,989.00
4	276	\$ 471,343	\$ 20,000.00	\$ 451,343.00
5	408	\$ 26,478	\$ 186,200.00	-\$ 159,722.00
6	464	\$ 12,157	\$ -	\$ 12,157.00
7	466	\$ 451,769	\$ 10,000.00	\$ 441,769.00

8	501	\$ 32,419	\$ 5,000.00	\$ 27,419.00
9	541	\$ 10,114	\$ 15,000.00	-\$ 4,886.00
10	587	\$ 140,370		\$ 140,370.00
11	655	\$ 52,956	\$ 263,120.00	-\$ 210,164.00
12	679	\$ 13,239	\$ 33,239.00	-\$ 20,000.00
13	742	\$ 108,406	\$ 30,000.00	\$ 78,406.00
14	859	\$ 1,046,741	\$ 430,000.00	\$ 616,741.00
15	955	\$ 81,195	\$ 140,000.00	-\$ 58,805.00
16	960	\$ 303,405	\$ 140,000.00	\$ 163,405.00

<b>17</b>	<b>971</b>	<b>\$ 40,456</b>	<b>\$ 21,500.00</b>	<b>\$ 18,956.00</b>
<b>18</b>	<b>982</b>	<b>\$ 30,342</b>	<b>\$ 10,000.00</b>	<b>\$ 20,342.00</b>
<b>19</b>	<b>1028</b>	<b>\$ 39,717</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ 39,717.00</b>
<b>20</b>	<b>1028</b>	<b>\$ 4,858</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ 4,858.00</b>
<b>21</b>	<b>1057</b>	<b>\$ 91,860</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ 91,860.00</b>
<b>22</b>	<b>1145</b>	<b>\$ 103,599</b>	<b>\$ 34,360.00</b>	<b>\$ 69,239.00</b>

*Tabla 16 - Relación del costo real vs lo invertido en mantenimiento*

La ganancia total representada por la suma de las ganancias teóricas de cada falla da un total de **\$1,633,642.00**.

Esto es una ganancia teórica aplicada a las fallas descritas, pero cabe aclarar que muchos de los gastos preventivos son repetitivos y que si se hacen una vez se evitaría la reinversión de los mismos, por lo cual esta ganancia puede crecer exponencialmente si detalladamente se revisan los tipos de mantenimiento preventivo y sus frecuencias.

#### 7.3.4. Tabla de inversión vs costo de acuerdo a especialidad

La segunda tabla se hará de acuerdo al tipo de falla, si es *hidráulica* o *eléctrica*.

Se organizarán de igual forma por horómetro hasta la falla cercana al MTBF determinado previamente (1180 horas).

La tabla arroja lo siguiente para los primeros fallos antes del MTBF:

i	Especialidad	Horometro	Total Mtto	Total preventivo
1	HIDRAULICO	122	\$ 187,256	\$ 186,200.00
4	HIDRAULICO	276	\$ 471,343	\$ 20,000.00
5	HIDRAULICO	408	\$ 26,478	\$ 186,200.00
6	HIDRAULICO	464	\$ 12,157	\$ -
7	HIDRAULICO	466	\$ 451,769	\$ 10,000.00
9	HIDRAULICO	541	\$ 10,114	\$ 15,000.00
11	HIDRAULICO	655	\$ 52,956	\$ 263,120.00
12	HIDRAULICO	679	\$ 13,239	\$ 33,239.00
14	HIDRAULICO	859	\$ 1,046,741	\$ 430,000.00
16	HIDRAULICO	960	\$ 303,405	\$ 140,000.00
17	HIDRAULICO	971	\$ 40,456	\$ 21,500.00
19	HIDRAULICO	1028	\$ 39,717	\$ -
23	HIDRAULICO	1216	\$ 33,098	\$ 140,000.00

Tabla 17 – Tabla de inversión vs costo de acuerdo a especialidad

La ganancia total representada por la suma de las ganancias teóricas de cada falla da un total de **\$1,445,259.00**

De este valor se puede inferir lo siguiente:

- De las 22 fallas determinadas inicialmente por horómetro, 13 son de tipo hidráulico, es decir, cerca del 60% de las fallas. El equipo por lo tanto tiende a fallar de forma hidráulica.
- El costo de las fallas determinadas de manera hidráulica iguala prácticamente al costo de las 22 fallas determinadas de forma inicial, es decir, casi todo el costo preventivo se debería invertir en la parte hidráulica para solucionar los costos totales de mantenimiento.

### ***7.3.5. Tabla de inversión vs costo de acuerdo a costo de mantenimiento total***

Por último, se organizarán las 44 fallas por costo total, desde costo mayor a menor, luego se mirará la especialidad a la que pertenece y se analizará el resultado.

i	Especialidad	Horometro	Total Mtto	Total preventivo
14	HIDRAULICO	859	\$ 1,046,741	\$ 430,000.00
24	HIDRAULICO	1269	\$ 583,066	\$ 50,000.00
36	ELECTRICO	1513	\$ 521,281	\$ 20,000.00
25	HIDRAULICO	1287	\$ 487,573	\$ 30,000.00
4	HIDRAULICO	276	\$ 471,343	\$ 20,000.00
7	HIDRAULICO	466	\$ 451,769	\$ 10,000.00

41	HIDRAULICO	1946	\$ 353,992	\$ 20,000.00
16	HIDRAULICO	960	\$ 303,405	\$ 140,000.00
44	ELECTRICO	2337	\$ 259,456	\$ -
31	MECÁNICO	1333	\$ 220,540	\$ 435,000.00
1	HIDRAULICO	122	\$ 187,256	\$ 186,200.00
34	HIDRAULICO	1446	\$ 155,916	\$ 191,200.00
10	INSPECCIÓN	587	\$ 140,370	
40	HIDRAULICO	1889	\$ 136,705	\$ -
32	HIDRAULICO	1359	\$ 129,140	\$ 10,000.00
35	ELECTRICO	1496	\$ 129,140	\$ 156,130.00
38	MECÁNICO	1683	\$ 121,026	\$ 5,000.00
13	ELECTRICO	742	\$ 108,406	\$ 30,000.00
22	ELECTRICO	1145	\$ 103,599	\$ 34,360.00
21	INSPECCIÓN	1057	\$ 91,860	\$ -
15	MECÁNICO	955	\$ 81,195	\$ 140,000.00
28	ELECTRICO	1327	\$ 72,942	\$ -
29	ELECTRICO	1327	\$ 60,785	\$ -
11	HIDRAULICO	655	\$ 52,956	\$ 263,120.00

2	ELECTRICO	127	\$ 50,570	\$ 10,000.00
17	HIDRAULICO	971	\$ 40,456	\$ 21,500.00
27	HIDRAULICO	1296	\$ 40,456	\$ -
19	HIDRAULICO	1028	\$ 39,717	\$ -
23	HIDRAULICO	1216	\$ 33,098	\$ 140,000.00
8	ELECTRICO	501	\$ 32,419	\$ 5,000.00
18	ELECTRICO	982	\$ 30,342	\$ 10,000.00
5	HIDRAULICO	408	\$ 26,478	\$ 186,200.00
3	ELECTRICO	150	\$ 25,141	\$ 156,130.00
37	HIDRAULICO	1588	\$ 24,314	\$ 130,000.00
26	HIDRAULICO	1287	\$ 23,480	\$ 255,132.00
30	ELECTRICO	1332	\$ 23,480	\$ -
12	HIDRAULICO	679	\$ 13,239	\$ 33,239.00
33	HIDRAULICO	1407	\$ 13,166	\$ 120,000.00
6	HIDRAULICO	464	\$ 12,157	\$ -
39	INSPECCIÓN	1722	\$ 11,740	\$ -
42	ELECTRICO	1952	\$ 11,740	\$ 20,000.00
9	HIDRAULICO	541	\$ 10,114	\$ 15,000.00
43	INSPECCIÓN	2061	\$ 10,114	\$ -
20	MECÁNICO	1028	\$ 4,858	\$ -

Tabla 18 – Tabla de inversión vs costo de acuerdo a costo de mantenimiento total

El costo total de las fallas es de **\$ 6'747.541 COP**.

Se puede inferir lo siguiente:

- Las primeras fallas dan un total de costo de **\$ 4'219.170 COP**, que corresponden al 63% del total de costo y se está hablando apenas de las primeras 8 fallas, casi la tercera parte de las fallas!
- De las primeras 8 fallas solo una corresponde a tipo eléctrico, es decir, se vuelve a concluir que las fallas de tipo hidráulico son el principal foco a atacar en toma de acciones de mantenimiento.
- Las acciones preventivas para el 63% de las fallas no tienen un costo tan alto frente a acciones preventivas que, si son costosas pero que solucionarían costo de mantenimiento bajos, por lo cual la idea de atacar las fallas más costosas son mantenimientos preventivos relativamente bajos debería ser la prioridad.



## **8. Impactos alcanzados / esperados**

El análisis de confiabilidad es una herramienta precisa y confiable, que permite obtener resultados relevantes basados en pocos muestreos, y que a partir de una serie de datos sistemáticos permite construir modelos matemáticos y estadísticos que facilitan la localización de las variables a estudiar. En este caso de mantenimiento, esas variables son de vital importancia para poder determinar los puntos críticos en los equipos, que generalmente son los indicadores maestros en toda gestión de mantenimiento: MTBF, MTTR, valores beta etc.

Para el presente caso el impacto fue considerable, no solo esperado sino también alcanzado, ya que las máquinas como se describió en el desarrollo inicial del documento, no tenían una hoja de vida confiable y metódica, sino sus datos llegaban incluso a ser aleatorios en distintos muestreos obtenidos, y al realizar el análisis de confiabilidad con distintos modelos tanto de desarrollo como de comprobación, se pudieron obtener estos indicadores representativos, que permitieron a su vez poder analizar individualmente cada registro.

De acuerdo al comportamiento matemático expresado en distribuciones de probabilidad de todos los comportamientos referentes a averías por parte del activo, fue importante lograr describir el comportamiento de los mismos, esto lleva al ingeniero de mantenimiento e a determinar qué acciones serán las mejores para conservar el activo y que aparte de esto sea un elemento seguro para su manipulación. Se lograron usar varias distribuciones de probabilidad y gracias a ellas encontrar a la que tuviese el mejor grado de aceptación

Este análisis que partió de un esquema macro y posteriormente se centró en cada registro, dio pie a un análisis financiero bastante útil, que no fue ajeno al análisis estadístico, sino que tomo todos los elementos obtenidos de este para poder ordenar la información de distintas

maneras y extraer de manera resumida lo evidenciado, centrándonos en los tipos de órdenes, en los técnicos, en el historial de fallos y en los repuestos y sus costos.

De esta manera el impacto del desarrollo del análisis conjunto estadístico y financiero resultó exitoso y permitió obtener conclusiones importantes para posteriores modificaciones al plan de mantenimiento del equipo o toma de acciones en el departamento de mantenimiento de la empresa.

## 9. Conclusiones

- La distribución Normal, para el estudio de caso fue la mejor aproximación a la curva PDF de los datos observados, con lo cual, será muy probable que los manlift con menos horas de trabajo se comporten de esta forma si no se realiza ningún tipo de mejora a las labores de mantenimiento.
- El MTBF para los Manlift es de 1108.54 h de acuerdo a la distribución normal, lo que sugiere que realizar actividades de mantenimiento preventivas antes de estas horas de uso será crucial para la vida del activo.
- La ejecución de ambos tipos de análisis permite una comprensión más amplia de la información obtenida, para este caso se pudo determinar que la mayoría de fallas e intervenciones del equipo son de tipo hidráulico, es decir, que todos los esfuerzos de mantenimiento deberían centrarse primero en atacar esta especialidad, para así mismo minimizar los problemas evidenciados.
- Financieramente se obtuvo que además de ser las fallas más frecuentes, las fallas de tipo hidráulico también son las más costosas, razón más evidente para realizar los ajustes pertinentes al plan de mantenimiento del equipo respecto a esta especialidad.
- No hay que dejar a un lado la especialidad eléctrica, ya que como resultado se obtiene una irregularidad importante en estas mismas, se puede concluir por tanto que estas fallas deben ser monitoreadas más de cerca, al no ser de criticidad importante como las hidráulicas, son por lo menos objeto de interés y deben ser por lo menos controladas.

- Lo obtenido por ambos estudios arroja un Pareto casi calcado a la teoría, donde casi todo el costo de las fallas determinadas de manera hidráulica iguala prácticamente al costo de las primeras fallas determinadas de forma inicial (por horómetro), es decir, un porcentaje bajo del total de todas las fallas ocupa casi el costo de todas las fallas en general. Los esfuerzos por lo tanto deberían centrarse bastante en invertir en la parte hidráulica y preventiva para solucionar los costos totales de mantenimiento.
- Las acciones preventivas para el 63% de las fallas no tienen un costo tan alto frente a acciones preventivas que, si son costosas pero que solucionarían costo de mantenimiento bajos, por lo cual la idea de atacar las fallas más costosas son mantenimientos preventivos relativamente bajos debería ser la prioridad.
- El desarrollo del análisis estadístico y luego el financiero para este caso tuvo un impacto importante ya que permitió una organización clara de la información, especialmente porque las hojas de vida de los equipos no eran 100% fiables, al no tener registros metódicos de la información y con bastante información aleatoria, que mediante la realización del análisis de confiabilidad con distintos modelos tanto de desarrollo como de comprobación, se pudieron obtener indicadores representativos, que permitieron a su vez poder analizar individualmente cada registro y encontrarle utilidad.
- Weibull es extremadamente útil para la planificación del mantenimiento, ya que en su desarrollo se pueden obtener parámetros particulares y útiles como la necesidad de inspecciones programadas, el periodo de revisión de algún dato concreto, determinación de un MTBF más exacto, la desviación de datos

particulares, la filtración de registros inservibles para el análisis estadístico propio, la aglomeración de fallas por intervalos para poder determinar en qué rango debería ser necesario intervenir el equipo entre muchos otros indicadores importantes.

## 10. Recomendaciones

- Fijar metas para el crecimiento de la confiabilidad del activo.
- Se debe iniciar una pronta implementación de prácticas asociadas al RCM, las cuales ayudaran a elaborar mejores metodologías para el incremento y sostenibilidad del ciclo de vida del activo.
- La Parametrización de la información en el software de mantenimiento es clave para llevar un mejor control del análisis de la información, para que esta sea más concluyente.
- Realizar análisis estadísticos de confiabilidad, por subsistemas de operación para este activo, incluyendo sistemas, eléctrico, mecánico, hidráulico, etc.

## 11. Bibliografía

- ▷ *El Método de mínimos cuadrados: definición y ejemplos* [✓] - MiProfe.com. (n.d.). Retrieved April 13, 2021, from <https://miprofe.com/minimos-cuadrados/>
- Abernethy, R. B. (n.d.). *The New Weibull Handbook* (Fifth Edit).
- ANAPAT. (2002). *Plataformas elevadoras móviles de personal (PEMP)* (COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (Ed.)).
- Attardi, L., Guida, M., & Pulcini, G. (2005). A mixed-Weibull regression model for the analysis of automotive warranty data. *Reliability Engineering and System Safety*, 87(2), 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.05.003>
- BULUT, M., & ÖZCAN, E. (2021). A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment. *Reliability Engineering and System Safety*, 205(August 2020), 107238. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107238>
- Calvo, E. A. (2017). MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MINAS VOLUMEN I: TEORÍA GENERAL DEL MANTENIMIENTO Y DE LA FIABILIDAD. *Universidad de Cantabria*.
- Ebden, M., Stranjak, A., & Roberts, S. (2010). Visualizing uncertainty in reliability functions with application to aero engine overhaul. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C: Applied Statistics*, 59(1), 163–173. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2009.00692.x>
- Gasca, M. C., Camargo, L. L., & Medina, B. (2017). Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial. *Información Tecnológica*, 28(4), 111–124. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000400014>
- Ghosh, D., & Roy, S. (2009). Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis.

*Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 403–407.

<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.01.007>

Hernandez Sampiere, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1991). Metodología de la Investigación. In M. de la L. Casas Pérez (Ed.), *Cuadernos de autoformación en participación social; CAPS 002*. McGraw-Hill.

Italy, C. s. p. . (2013). *Manual de uso y mantenimiento de Traccess 170. 01(Mi)*, 64.

Lien, P., & Nicholls, D. (2013, June 5). *Unlocking Weibull analysis | MachineDesign*.

<https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21831580/unlocking-weibull-analysis>

*Manlift, plataformas de elevación para trabajos en altura*. (n.d.). Retrieved December 9, 2020, from <https://gruasinstallworld.com/manlift/>

Mekonnen, Y., Aburbu, H., & Sarwat, A. (2018). Life cycle prediction of Sealed Lead Acid batteries based on a Weibull model. *Journal of Energy Storage*, 18(March), 467–475.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2018.06.005>

Milkie, C. M., & Perakis, A. N. (2004). Statistical methods for planning diesel engine overhauls in the U. S. Coast Guard. *Naval Engineers Journal*, 116(2), 31–42.

<https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2004.tb00266.x>

Modarres, M., Kaminskiy, M. P., & Krivtsov, V. (2017). *Reliability Engineering and Risk Analysis : A Practical Guide, Third Edition: Vol. Third edit*. CRC Press.

<http://ezproxy.utadeo.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=1768659&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Pascale, E., Freneaux, T., Sista, R., Sannino, P., Marmo, P., & Bouillaut, L. (2017). Application of the Weibull distribution for the optimization of maintenance policies of an electronic



railway signaling system. *Safety and Reliability - Theory and Applications - Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017*, 3409–3416.

<https://doi.org/10.1201/9781315210469-429>

Patarroyo, L., & Roberto, Q. (2012). Optimización del costo de mantenimiento de sistemas de distribución eléctrica: una aplicación a la función de distribución de Weibull. *Revista Universidad EAFIT*, 36(120), 9–24.

R Dolas, D., & Deshmukh, S. (2015). Reliability Ananlysis of Cooling System of Diesel Engine. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 3(2), 57–62.

<https://doi.org/10.13189/ujme.2015.030205>

Rymarz, J., Niewczas, A., & Stoklosa, J. (2015). Reliability evaluation of the city transport buses under actual conditions. *Transport and Telecommunication*, 16(4), 259–266.

<https://doi.org/10.1515/ttj-2015-0023>

Salud, D. S. y. (2021). *Normatividad Trabajo en Alturas 2021*. Normatividad Trabajo En Alturas.

Sánchez, P., & Andrés, S. (2019). *Aproximación De La Confiabilidad Para Optimizar Procesos De Mantenimiento Y Productivos Con Distribución Weibull*.

Troyer, D. (n.d.). *¿Por qué es necesario el análisis de Weibull? - RELIABILITY CONNECT® en Español*. Retrieved April 13, 2021, from <https://esp.reliabilityconnect.com/por-que-es-necesario-el-analisis-de-weibull/>

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena Edición). Pearson.

*What is statistical analysis?* (n.d.). Retrieved December 9, 2020, from <https://whatis.techtarget.com/definition/statistical-analysis>

Yong, T. (2004). *Extended Weibull Distributions in Reliability Engineering*. NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE.

Zulkafli, N. I., & Dan, R. M. (2016). Investigation of maintenance performance for a gasification process unit using Weibull analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(3), 252–263. <https://doi.org/10.1108/JQME-08-2015-0039>