

Diseño de un plan de mantenimiento preventivo/predictivo para los precipitadores electrostáticos de la central Termoguajira Gecelca S.A. E.S.P

Norvellys Cárdenas Torres

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Tarcisio Leal García

Ingeniero electricista

Codirector

Jairo Blanco Solano

Doctor en ingeniería

Tutor

Moisés Alejandro Coba Pinedo

Ingeniero electricista de servicios técnicos en Termoguajira

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánica

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis padres Marelvís Torres y Norbel José Cárdenas por el apoyo incondicional en mi formación profesional y personal, gracias por estar en pie ante las dificultades que juntos superamos, por cada palabra de apoyo y por el ejemplo de perseverancia que me permiten tener los pies siempre en la tierra y ser una persona llena de valores.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por ser la mejor Alma máter y brindarme una educación de calidad como Ingeniera Electricista.

A la Empresa Gecelca S.A donde se desarrolló el trabajo de grado, por permitirme la realización del mismo, por abrirme las puertas de Termoguajira y ser acogida por la calidad humana de todo su equipo de trabajo.

Expreso un profundo agradecimiento a mis amigas María Laura, Kelly, Angie que estuvieron siempre brindándome su apoyo, por los momentos compartido y acompañamiento en todas las situaciones.

Tabla de contenido

Introducción.....	11
1. Generalidades del trabajo de grado.....	13
1.1 Descripción del problema.....	13
1.2 Justificación para solucionar el problema.....	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Alcance.....	16
1.5 Delimitación para el desarrollo del trabajo de grado	16
1.6 Limitaciones	17
2. Estado del arte	18
2.1 Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo para los activos de la empresa industriaCTS S.A.S	18
2.2.....	18
2.3 Aproximación de la confiabilidad para optimizar procesos de mantenimiento y productivoscon distribución Weibull.	18
2.4 Optimización del mantenimiento planeado de una línea de producción de bebidas carbonatadas	19
2.5 Estudio de la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicado a grupos electrógenos prime	20
2.6 Plan de Mantenimiento de Precipitadores Electroestáticos de una Planta de Celulosa.....	21
2.7 Análisis estadístico de confiabilidad para equipos de elevación tipo Manlift	22
3. Los precipitadores electrostáticos y su contexto operacional.....	23
3.1 Principio de funcionamiento.....	25
3.2 Componentes	26
4. Análisis estadístico de confiabilidad.....	29
4.1 Crow Amsaa o crecimiento de la confiabilidad	33
4.1.1 Función de densidad de probabilidad	36
4.2 Modelos estadísticos	38
4.2.1 Distribución normal.....	38
4.2.1.1 Función de densidad de probabilidad Normal (PDF) $f(t)$	39
4.2.1.2 Función de probabilidad de falla (Desconfiabilidad) Normal $F(t)$	40
4.2.1.3 Función de confiabilidad de Normal $R(t)$	41
4.2.1.4 Función Hazard o Tasa de riesgo Normal $h(t)$	42
4.2.1.5 Tiempo medio entre reparaciones MTTR	43

4.2.2	Distribución de Weibull de dos parámetros	44
4.2.2.1	Mínimos cuadrados.....	45
4.2.2.1.1	Cálculo de la variable x	45
4.2.2.1.2	Cálculo variable y	45
4.2.2.1.3	Regresión lineal	46
4.2.2.2	Función de densidad de probabilidad de Weibull (PDF) $f(t)$	48
4.2.2.3	Función de probabilidad de falla (Desconfiabilidad) de Weibull $F(t)$	49
4.2.2.4	Función de confiabilidad de Weibull $R(t)$	50
4.2.2.5	Función Hazard o tasa de riesgo de Weibull $h(t)$	51
4.2.2.6	MTTR tiempo medio entre reparaciones	52
4.2.3	Distribución Log normal.....	54
4.2.3.1	Función de densidad de probabilidad de Log normal (PDF) $f(t)$	55
4.2.3.2	Función de probabilidad de falla (Desconfiabilidad) Log normal $F(t)$	56
4.2.3.3	Función de confiabilidad Log normal $R(t)$	57
4.2.3.4	Función Hazard o tasa de riesgo Log normal $h(t)$	58
4.2.3.5	MTTR tiempo medio entre reparaciones	59
4.3	Pruebas de bondad de ajuste	60
4.3.1	Prueba Chi-cuadrado	60
4.3.2	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	62
5.	PMO.....	65
5.1	Paso 1: Recopilación de tareas.....	66
5.2	Paso 2: Análisis de Modos de Falla (FMEA).....	66
5.3	Paso 3: Racionalización y Revisión del FMA.....	67
5.4	Paso 4: Análisis funcional	67
5.5	Paso 5: Evaluación de consecuencias.....	67
5.6	Paso 6: Determinación de las políticas de mantenimiento	67
5.7	Paso 7: Agrupación y revisión	68
5.8	Paso 8: Aprobación e implementación	68
5.9	Paso 9: Programa de vida y mejoramiento continuo	69
6.	Implementación del PMO	69
6.1	Paso 1: Recopilación de tareas.....	70
6.2	Paso 2: FMEA.....	73
6.3	Paso 6: Determinación de las actividades de mantenimiento	83
6.3.1	Tarea de mantenimiento predictivas:.....	84
6.3.2	Tareas de mantenimiento preventivas.....	85
6.3.2.1	Estructura contenedora (Casing)	86

6.3.2.2	Aisladores y sistema de calefacción (Resistencias).....	87
6.3.2.3	Parrillas de distribución de gases (entrada/salida/deflectoras).	88
6.3.2.4	Electrodos de emisión.....	89
6.3.2.5	Sistema de golpeo.....	90
6.3.2.6	Placas colectoras.....	91
6.3.2.7	Tolvas	92
6.3.2.8	Sistema Air Flushing	93
6.3.2.9	EPIC III.....	94
7.	Conclusiones	95
	Referencias Bibliográficas.....	97

Índice de Tablas

Tabla 1 Eficiencia teórica de los campos 1 y 4.....	26
Tabla 2 Función de los componentes principales de los PES	27
Tabla 3 Interpretación del Método de Daune.....	34
Tabla 4 Muestra de los 21 primeros datos calculados con las variables del método de Duane...	35
Tabla 5 Particiones para hallar el PDF a partir de las horas de reparación de los Precipitadores de Termoguajira.....	37
Tabla 6 Valores estipulados de Chi Cuadrado	61
Tabla 7 Valores estipulados de K-S.....	63
Tabla 8 Descripción de las actividades de mantenimiento realizadas a precipitadores.....	72
Tabla 9 Análisis de modos de falla de la Estructura contenedora o Casing	76
Tabla 10 Análisis de modos de falla del Sistema de distribución de gases	77
Tabla 11 Análisis de modos de falla del sistema de calentamiento	78
Tabla 12 Análisis de modos de falla del sistema de golpeo del sistema de emisión y colecta....	79
Tabla 13 Análisis de modos de falla del sistema de emisión.....	80
Tabla 14 Análisis de modos de falla del sistema de colecta	81
Tabla 15 Análisis de modos de falla de las tolvas	82
Tabla 16 Análisis de modos de falla del sistema Air flushing.....	83
Tabla 17 Actividades de mantenimiento propuestas para el Casing.....	86
Tabla 18 Actividades de mantenimiento propuestas para Aisladores y resistencias de calefacción	87
Tabla 19 Actividades de mantenimiento propuestas para parrillas de distribución de gases	88

Tabla 20 Actividades de mantenimiento propuestas para los electrodos de emisión	89
Tabla 21 Actividades de mantenimiento propuestas para el sistema de calefacción.....	90
Tabla 22 Actividades de mantenimiento propuestas para las placas colectoras	91
Tabla 23 Actividades de mantenimiento propuestas para las tolvas.....	92
Tabla 24 Actividades de mantenimiento propuestas para el sistema Air Flushing	93
Tabla 25 Actividades de mantenimiento propuestas para el EPIC III	94

Índice de Figuras

Figura 1 Precipitador electroestático ALSTOM POWER instalado la Unidad I de Termoguajira.....	24
Figura 2 Datos en Mainsaver del equipo en las unidades I y II.	29
Figura 3 Datos de Mainsaver exportados.	32
Figura 4 Método de Daune	36
Figura 5 Histograma de densidad de frecuencia acumulada.....	38
Figura 6 Función $f(t)$ de la distribución Normal	40
Figura 7 Función $F(t)$ de la distribución Normal	41
Figura 8 Función $R(t)$ de la distribución Normal.....	42
Figura 9 Función $h(t)$ de la distribución Normal.....	43
Figura 10 Representación de MTTR para cada función de densidad.....	44
Figura 11 Regresión lineal de Weibull.....	47
Figura 12 Función $f(t)$ de Weibull.....	49
Figura 13 Función $F(t)$ de Weibull.....	50
Figura 14 Función $R(t)$ de Weibull	51
Figura 15 Función $h(t)$ de Weibull.	52
Figura 16 Representación de MTTR para cada función de densidad.....	53
Figura 17 Función $f(t)$ de la distribución Log Normal	55
Figura 18 Función $F(t)$ para la distribución Log Normal	56
Figura 19 Función $R(t)$ para la distribución Log Normal.....	57
Figura 20 Función $h(t)$ para la distribución Normal.....	58
Figura 21 Representación de MTTR para cada función de densidad.....	59
Figura 22 Función PDF de las 3 pruebas realizas Vs curva de los datos reales.....	64
Figura 23 Función de confiabilidad $R(t)$ Vs la curva de los datos reales	65
Figura 24 Interfaz de software IRCM.....	74

Resumen

Título: Diseño de un plan de mantenimiento preventivo/predictivo para los precipitadores electrostáticos de la central Termoguajira Gecelca S.A. E.S.P.*

Autor: Norvellys Cárdenas Torres**

Palabras Claves: Mantenimiento preventivo/predictivo, Confiabilidad, Precipitadores electrostáticos, PMO, distribuciones de confiabilidad.

El presente trabajo de grado tiene como propósito diseñar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los precipitadores electrostáticos instalados en la central termoeléctrica Termoguajira, con el objeto de disminuir los mantenimientos correctivos y prolongar el óptimo funcionamiento del activo. En primera instancia se presenta la revisión de diversos estudios, donde se exponen distintos métodos estadísticos y técnicas de mantenimiento para mejorar la confiabilidad de los activos en la industria con miras en seleccionar un método a implementar en el desarrollo de este trabajo de grado. Se inicia con la obtención de información de las fallas reportadas en el historial de mantenimiento de los precipitadores electrostáticos contenido en un software de mantenimiento asistido por computadora (CMMS) de Termoguajira llamado Mainsaver, para luego ser filtrada y ordenada. Posteriormente se emplea el método de Duane a los datos para establecer un panorama del mantenimiento actual mediante la interpretación del resultado de acuerdo a criterios que estipula el método. Después, se aplican tres distribuciones estadísticas (Normal, Weibull 2Py Log Normal) para describir el comportamiento de los tiempos de reparación de los precipitadores electrostáticos, determinando las funciones de confiabilidad correspondientes a cada distribución y mediante las pruebas de ajuste de bondad (Chi-Cuadrado y K-S) se selecciona el modelo más compatible con los datos estudiados. Por último, se implementa la estrategia de mantenimiento PMO y con los resultados obtenidos se determinan las actividades de mantenimiento preventivo/predictivo y tiempo recomendado de ejecución de las mismas.

*Trabajo de grado

**Facultad Fisicomecánica. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director Tarcisio Leal García. Codirector Jairo Blanco Solano

Abstract

Title: Design of a preventive/predictive maintenance plan for the electrostatic precipitators of the power plant Termoguajira Gecelca S.A. E.S.P.*

Author: Norvellys Cárdenas Torres**

Keywords: Preventive/predictive maintenance, Reliability, Electrostatic precipitators, PMO, reliability distributions.

The purpose of this degree work is to design a preventive/predictive maintenance plan for the electrostatic precipitators installed in the Termoguajira thermoelectric power plant, in order to reduce corrective maintenance and prolong the optimal operation of the asset.

In the first instance, a review of several studies is presented, where different statistical methods and maintenance techniques to improve the reliability of the assets in the industry are exposed in order to select a method to be implemented in the development of this degree work. It begins with obtaining information of the failures reported in the maintenance history of the electrostatic precipitators contained in a computer-assisted maintenance software (CMMS) of Termoguajira called Mainsaver, to be then filtered and sorted. Subsequently, Duane's method is applied to the data and an overview of the current maintenance is established by interpreting the result according to already stipulated criteria. Then, three statistical distributions (Normal, Weibull 2P and Log Normal) are applied to describe the behavior of electrostatic precipitator repair times, determining the reliability functions corresponding to each distribution and by means of goodness-of-fit tests (Chi-Square and K-S) the model most compatible with the data studied is selected. Finally, the PMO maintenance strategy is implemented and with the results obtained, the preventive/predictive maintenance activities and their recommended execution time are determined.

*Bachelor Thesis

**Facultad Fisicomecánica. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director Tarcisio Leal García. Codirector Jairo Blanco Solano

Introducción

El mantenimiento juega un papel importante en la producción, los costos operacionales y la prestación de servicios de la industria, por lo que mantener sus activos físicos operativos el mayor tiempo posible son las expectativas de toda compañía. Sin embargo, se evidencia que los programas de mantenimientos presentan falencias cuando se adquieren activos sin recibir un programa de mantenimiento formal o lo que es común los problemas comienzan desde la fase de diseño, como resultado se recae en un círculo vicioso de acciones correctivas y mantenimientos no planificados e ineficientes.

En la actualidad existen nuevas investigaciones y técnicas implementadas en estrategias de mantenimiento para ayudar a desarrollar políticas de mantenimiento bien enfocadas, La optimización del mantenimiento planeado o PMO por sus siglas en inglés (Planned Maintenance optimization) es implementada en plantas en operación, ya que identifica que partes del plan de mantenimiento actual es útil y cual es inadecuado (Hernandez, J, Chica, G. 2009).

Lo que se realiza en este trabajo es la implementación del PMO junto con un análisis estadístico de confiabilidad para los precipitadores electrostáticos de la planta Termoguajira, tomando como referencia y base de datos, todo el historial de mantenimiento registrado en Mainsaver, de esta manera analizar los resultados y poder determinar nuevas actividades de mantenimiento focalizadas a aumentar la disponibilidad de los PES, la calidad del proceso control de emisiones de material particulado y cumplir con los estándares de seguridad ambiental.

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. Generalidades del trabajo de grado

1.1 Descripción del problema

GECELCA S.A E.S.P es una empresa generadora y comercializadora de energía eléctrica y de gas natural en Colombia, con presencia en el municipio de Dibulla, La Guajira con la central Termoguajira y en el municipio de Puerto Libertador, Córdoba con la central Gecelca 3.

Termoguajira, lugar del presente estudio, está conformada por las Unidades I y II de generación térmica turbo vapor marca Mitsubishi, con capacidad para generar energía eléctrica usando gas y carbón como combustible. El carbón es usado como combustible principal para su operación y el gas natural como combustible secundario para el arranque de las unidades generadoras (Gecelca, Página web corporativa. <https://www.gecelca.com.co/>). Los Precipitadores Electrostáticos son equipos importantes para el control de emisiones de material particulado provenientes de la quema de carbón en la caldera de fuerza, estos se encuentran situados entre la caldera y la chimenea, la indisposición de los PES implica la parada forzada o limitación de la generación no programada de las unidades para conservar la integridad ambiental estipulada por la resolución No 2254 emitida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en Colombia.

Los mantenimientos para los PES implementados en Termoguajira no son efectivos, se centran en la eliminación de fallas más que en la prevención de las mismas, por lo que en el historial de mantenimiento se evidencia que las acciones correctivas prevalecen sobre las actividades preventivas. Por las características de estos equipos, muchos de sus componentes no se pueden revisar mientras se encuentran operativos, por lo cual, las inspecciones y actividades de mantenimiento se limitan a los OVER HAULS programados, tiempos que en ocasiones no se cumplen por condiciones generales de la central, postergando la posibilidad de inspeccionar y

reparar siguiendo las recomendaciones del fabricante, además de la indisponibilidad de repuestos en almacenamiento hacen que muchas fallas no puedan ser reparadas en los tiempos previstos. Como consecuencia, las fallas son muy recurrentes y el área de mantenimiento ejecuta las acciones correctivas en pocas horas, dado que generalmente la prioridad es que se reanude la generación de energía lo más pronto posible. Esto implica que se generen sobrecostos relacionados con la conversión de esas reparaciones temporales a definitivas, se inicia la duplicación de tareas, las horas hombre incrementan más de lo necesario desperdiciando recursos y disminuyendo las tareas preventivas (Turner, S. OMCS).

1.2 Justificación para solucionar el problema

La central Termoguajira no cuenta con una estrategia de mantenimiento sólida para los PES. El desarrollo e implementación de un plan de mantenimiento predictivo/preventivo debe lograr aumentar la confiabilidad de estos equipos, reducir el esfuerzo del área de mantenimiento evitando la aparición de fallas prevenibles, definir y ejecutar tareas que generen valor agregado, disminuir los costos extras producto de las reparaciones recurrentes y el impacto ambiental.

Actualmente se cuenta con un amplio conocimiento del mundo del mantenimiento, tal como lo estipulado por el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) y el sistema de optimización de mantenimiento planeado (PMO), metodologías que aplican conceptos prácticos para la revisión de los requerimientos de mantenimiento, el historial de fallas y la información técnica de los activos (García, O. 2007). Para el análisis de esta información se emplean modelos matemáticos enfocados en análisis estadísticos que facilitan la toma de decisiones en la determinación de actividades de mantenimiento para aumentar su disponibilidad a lo largo del tiempo y que realicen lo que sus usuarios quieren que haga. Las distribuciones de probabilidad como, por ejemplo: normal,

exponencial, Weibull, Log Normal entre otras, son herramientas que permiten analizar gráficas y descubrir fallas cuyas consecuencias podrían ser por inadecuadas prácticas de mantenimiento, condiciones de operación no favorables, o aspectos de fallos en el diseño (Espinosa, J, Rativa, E. 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un plan de mantenimiento a través de propuestas de mejora del plan de mantenimiento actual siguiendo la estrategia del PMO (optimización mantenimiento planeado) para los precipitadores electrostáticos de las unidades generadoras de Termoguajira.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar la información técnico operativa de los precipitadores electrostáticos instalados en Termoguajira con el fin de entender su contexto operacional mediante la revisión de manuales suministrados por el fabricante.
- Seleccionar un análisis estadístico de confiabilidad a partir de una revisión de métodos expuestos en la literatura científica que aborden la solución teniendo en cuenta el historial de fallas de los precipitadores de Termoguajira.
- Establecer tareas de mantenimiento preventivas/predictivas que sean costo-efectivas con el fin de evitar paradas imprevistas y asegurar la confiabilidad de los precipitadores electrostáticos.

1.4 Alcance

Este trabajo de grado tiene como objetivo contribuir al mejoramiento del plan de mantenimiento de GECELCA S.A E.S.P, específicamente para los precipitadores electrostáticos instalados en la central TERMOGUAJIRA, para aumentar su disponibilidad y confiabilidad en el proceso de control de emisiones producto de la generación de energía con combustible fósil.

Este trabajo de grado propuso la implementación del PMO, estrategia aplicable a activos en funcionamiento con el fin de racionalizar todo el mantenimiento preventivo (PM) y así asegurar que existe valor agregado y no se duplican tareas. (Turner, S. OMCS) Para ello, se recopila la información de los documentos suministrados por el fabricante para entender el funcionamiento y contexto operacional de los PES en Termoguajira.

Se aplica el Análisis estadístico de confiabilidad. Para evaluar la confiabilidad se implementa el modelo estadístico propuesto por Alberto Mora (Mora, 2009), utilizando las distribuciones Normal, Log Normal y Weibull para parametrizar el comportamiento de las fallas y en base al tratamiento y análisis de los datos determinar el estado del activo

Se utiliza el RCM como apoyo para realizar el Análisis de Modos de Falla (FMEA), se listan las funciones y fallas funcionales de cada sistema y subsistema que conforman los PES marca ALSTOM, se filtran las fallas almacenadas en el historial del CMMS Mainsaver y se agregan las fallas que se considera tienen probabilidad de ocurrir. Una vez es realizado el FMEA, es posible definir actividades predictivas y preventivas de mantenimiento y tiempos adecuados de ejecución.

1.5 Delimitación para el desarrollo del trabajo de grado

El trabajo de grado se propone como un plan de mejora que está realizando GECELCA S.A E.S.P en el mantenimiento de todos sus activos. El presente trabajo de grado bajo la modalidad práctica

empresarial se desarrolló desde el mes de marzo hasta el mes de julio del 2022.

La recolección de datos del historial de fallas, obtención de información técnica y operativa, revisión de informes de mantenimientos contratados para la reparación de los PES se realiza con el permiso de la empresa GECELSA S.A. E.S.P, Central Termoeléctrica Termoguajira.

1.6 Limitaciones

- El historial de falla cuenta con descripciones del trabajo realizado y actividades de mantenimiento muy generales y no se cuenta con las particiones de los sistemas y subtemas de los PES.
- No se cuenta con un diario de anotaciones diligenciado por los operadores del área, lo que evidencia que el personal no hace rondas periódicas para el registro de medidas e inspecciones recomendadas por el fabricante.
- Órdenes de trabajo sin fecha de terminación o fechas de cierre incorrectas.
- Términos de los componentes usados por el personal no se encuentran estandarizados, cada uno de los sistemas que componen a los precipitadores no son nombrados de la manera indicada por el fabricante, lo que obliga a realizar la revisión conjunta con el personal de mantenimiento de cada una de las fallas registradas en el CMMS para determinar la parte que falla.

2. Estado del arte

2.1 Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo para los activos de la empresa industria CTS S.A.S

En 2015, el autor Nubia Millerlandy Sánchez, en el desarrollo su trabajo de grado en la Universidad Industrial de Santander, desarrolla un plan de mantenimiento para la empresa CTS, dedicada al armado de tableros eléctricos, ubicada en la ciudad de Bucaramanga-Santander. En este estudio se propone realizar un análisis de criticidad para determinar el grupo de activos para el estudio. Se destaca la implementación de la matriz de frecuencia de falla teniendo cinco criterios: daño al personal, Impacto a la población, Impacto al ambiente, Impacto a la producción y daños a las instalaciones. De esta manera determinan los equipos relevantes dentro del plan de mantenimiento preventivo, también se aplica el teorema de Pareto para visualizar el impacto económico de fallas y el costo representativo en la empresa y por último se realiza una plataforma office para el mantenimiento preventivo, el cual contiene el inventario de los activos, con su respectiva hoja de vida y fichas técnicas (Sánchez, 2015).

Se destaca la implementación de codificación para todos los activos, se utiliza el tiempo promedio entre falla (TPEF) para estimar la frecuencia y tabla de categoría de impactos para determinar las consecuencias, la criticidad está dada por la ecuación:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{consecuencia} \quad (1)$$

2.2 Aproximación de la confiabilidad para optimizar procesos de mantenimiento y productivos con distribución Weibull.

En 2019, el autor Sergio Andrés Pulgarín Sánchez explica la importancia de entender la calidad

y la confiabilidad de un equipo como un todo, utiliza un enfoque kantiano para estudiar y comprender la estrecha relación entre los sistemas de producción y de mantenimiento. Indica la importancia de obtener indicadores, entender y aplicar los métodos estadísticos usados a nivel mundial en el área de mantenimiento, siendo esto una herramienta para controlar el funcionamiento de las máquinas y, por lo tanto, los procesos productivos. Se hace énfasis en la versatilidad de la aplicación del método de Weibull en la confiabilidad y su ajuste a la curva de Daives, aplicándose en esta ocasión procesos productivos (Pulgarín, 2019).

2.3 Optimización del mantenimiento planeado de una línea de producción de bebidas carbonatadas

En 2018, Angelica María Ponce Mostacero, se destaca la explicación de las ventajas y desventajas de las distintas tácticas de mantenimiento, entre las cuales se nombraron: Mantenimiento productivo total (TPM), Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y Optimización del mantenimiento planeado (PMO), siendo esta última la estrategia implementada a una línea de producción de bebidas carbonatadas, metodología aplicada a activos en la fase de operación.

El autor estableció un ranking de mayor a menor criticidad en base a la ineficiencia mecánica operacional y con el fin de jerarquizar los activos. Se diferenciaron tres diferentes tipos de eficiencias:

- Eficiencia de línea, dada por la ecuación $E_{línea} = t_{oper} - tp.int$, donde t_{oper} es el total detiempo operativo y $tp.int$ es el tiempo de paradas internas.
- Eficiencia de la producción, dada por la ecuación $E_{producción} = E_{línea} - tp.ext$, donde $E_{línea}$ fue explicada anteriormente y $tp.ext$ corresponde a los tiempo de paradas externas.
- Eficiencia pagada, dada por la ecuación $E_{pagada} = E_{producción} - tp.programadas$, donde

*E*producción fue explicada anteriormente y *tp.programadas* corresponde a los tiempo de paradas programadas.

A la línea de producción con mayor ineficiencia, se realiza la jerarquización de los sistemas de acuerdo a la función de su impacto, por lo que se implementa el análisis de criticidad *Nivel de criticidad = Frecuencia * Consecuencia*, posteriormente se realiza el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) técnica utilizada para cuantificar y clasificar las fallas en el diseño, operación y mantenimiento del activo físico. El fin de esta investigación es analizar cada una de las fallas que originaron estos valores altos de ineficiencia y encontrar la causa raíz de cada una de ellas para luego realizar un plan de mantenimiento que contenga las actividades necesarias y suficientes para erradicar las fallas con la implementación de los 9 pasos del PMO (Ponce, 2018).

2.4 Estudio de la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicado a grupos electrógenos prime

En 2020, Los autores Cesar gallegos, Mayra Viscaíno y Sergio Villacrés, en la publicación en la revista digital ecuatoriana “conciencia digital”, realizan un estudio para brindar una secuencia lógica de pasos para el cálculo de indicadores de análisis RAM (Reability, Availability, Maintainability), fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. Como muestra de estudio utilizan los datos operativos de 51 generadores prime, recolectaron por 11 meses tiempo operativos entre fallos y tiempo de reparación entre fallos.

Antes de calcular los indicadores de confiabilidad realizan una delimitación y estructuración jerárquica de los equipos, siguiendo la metodología indicada por la norma ISO 14224, se registra la información base categorizando los datos en: Identificación, Datos de mantenimiento y Recursos de mantenimiento. Para el análisis RAM se calculan funciones estadísticas: la función de la

densidad de probabilidad $f(t)$, la función de distribución acumulada de la probabilidad $F(t)$, función de la fiabilidad $R(t)$ y función de la tasa de fallos $\lambda(t)$, para las distribuciones, exponencial y Weibull para verificar a qué tipo de distribución se ajustan los datos.

Indica la importancia de los indicadores de fiabilidad y mantenibilidad para determinar hacia donde se deben enfocar los esfuerzos para conservación de los activos, encaminado a alargar los tiempos entre fallos y disminuir los tiempos de reparación (Gallegos, C, Vizcaíno, M, Villacrés, S, 2020).

2.5 Plan de Mantenimiento de Precipitadores Electroestáticos de una Planta de Celulosa

El autor Mario Gonzalo Pulgarín, en el desarrollo de su tesis para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica en la Universidad del BÍO-BÍO en Concepción-Chile, desarrolla un plan de mantenimiento preventivo a precipitadores electroestáticos instalados en una planta de celulosa, se basa en un análisis de criticidad para determinar el componente del equipo al que se le debe dedicar mayor atención en las actividades de mantenimiento. Se listan también, las fallas más comunes y las actividades de mantenimiento correctivos realizados a cada uno de ellos, en base a esto, se diseña un plan de mantenimiento preventivo para que el funcionamiento de los equipos sea por periodos prolongados.

Hace mención de los objetivo y ventajas del mantenimiento preventivo, donde es importante que no se acepten trabajos mal ejecutados, por lo que es necesario trabajar con una buena organización, procedimientos sencillos de coordinación y mantener el control riguroso para que el resultado sea efectivo (Pulgarín, 2014).

2.6 Análisis estadístico de confiabilidad para equipos de elevación tipo Manlift

En 2021, los autores Edwin Alexander Rativa y Juan Esteban Espinosa, en su estudio de Especialización en Gerencia de Mantenimiento, en la universidad ECCI localizada en Bogotá, aplican análisis estadísticos de confiabilidad y financiero a plataformas de trabajo elevable Traccess 170 tipo Manlift propiedad de la empresa ECORENTAL SAS, los cuales presentan poca disponibilidad al momento de ser solicitado dicho activo por el departamento comercial.

Los resultados son obtenidos aplicando tres distribuciones de probabilidad: Distribución Normal, Log Normal y Weibull 2P, se realiza el cálculo de las funciones de probabilidad de acuerdo a la distribución aplicada: densidad de probabilidad $f(t)$, función de probabilidad de falla $F(t)$, función de confiabilidad $R(t)$ y función de tasa de riesgo $h(t)$. Se aplican pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y prueba de Chi Cuadrado a cada una de las distribuciones para determinar a cuál se ajusta los datos estudiados y con base en los resultados realizar análisis financiero. Es importante hacer mención de la implementación del método de Duane, método que al obtener el valor de β y compararlo con los valores ya establecidos, se puede estimar el comportamiento del plan de mantenimiento actual. Obteniendo indicadores representativos con la aplicación de distintos modelos el ingeniero de mantenimiento puede determinar acciones de mejora para conservar los activos con un impacto operacional y financiero aceptable (Rativa & Espinosa, 2021).

Se concluye que actualmente se ha consolidado la implementación de análisis estadísticos en el monitoreo de condición del estado de los activos de la industria, siendo el almacenamiento y procesamiento de datos un pilar fundamental para la estimación de las metodologías de confiabilidad existentes. Bajo la necesidad inherente de la continuidad de los procesos productivos de manera rentable y confiable en Termoguajira estos estudios brindan una guía para el desarrollo

de este trabajo de grado.

3. Los precipitadores electrostáticos y su contexto operacional

Los PES instalados actualmente en las Unidades I y II de la central Termoguajira son de la marca ALSTOM POWER, son precipitadores gemelos, es decir, sus componentes son iguales, pero varían en el tamaño y por ende en la capacidad de colecta.

¿Qué son los precipitadores? Los precipitadores electrostáticos son dispositivos para el control de emisiones de material particulado presente en gases contaminados en procesos de combustión industriales, utilizan un campo electrostático para ionizar las partículas del gas contaminado mediante un conjunto de electrodos a alto voltaje hasta la superficie de electrodos colectores. Estas partículas deben ser removidas de los electrodos colectores por lo que son precipitadas hacia tolvas para evitar que se reencaucen en el flujo de gas.

Los precipitadores electrostáticos instalados en Termoguajira son tipo seco y están configurados por dos cámaras, cada una equipada por tres campos conformados por hileras de placas colectoras y de electrodos tipo espiral operando en paralelo, lo que permite tener muchas líneas de flujo y como resultado es adecuado para manejar grandes volúmenes de gas (ALSTOM,1995).

Figura 1

Precipitador electrostático ALSTOM POWER instalado la Unidad I de Termoguajira



Nota. Tomado del informe de inspección del precipitador electrostático caldera de la unidad 1, Sergemco LTDA, Gecelca 2020.

3.1 Principio de funcionamiento

Para comprender el funcionamiento de los precipitadores electrostáticos es necesario conocer los componentes eléctricos y mecánicos que conforman estos equipos y su trabajo en conjunto para dar cumplimiento a su función principal, la cual es, separar partículas sólidas del gas a limpiar para el control de emisiones al ambiente. En Termoguajira los PES se encuentran entre la caldera de fuerza y la chimenea, el gas contaminado producto de la combustión de carbón en la caldera es direccionado mediante un ventilador hacia los ductos de entrada del precipitador. En la entrada se encuentran parrillas distribuidoras de gases para proporcionar una velocidad constante en toda la sección interna del PES y enseguida atraviesa una serie de electrodos tipo espiral conocidos como electrodos de emisión y electrodos de colecta tipo placas conocidos como placas colectoras, dispuestos en una estructura soportada por cuatro aisladores conectados a un transformador rectificador de alta tensión, instalados en la parte exterior del PES.

Un transformador rectificador es conectado a la estructura de los electrodos y la tierra, creando un fuerte campo eléctrico entre los electrodos de emisión y las placas de colecta. El campo eléctrico tiende a ser mayor cerca de la superficie de los electrodos tipo espiral, lo cual desencadena una descarga eléctrica; de tal manera que se produce lo que se conoce como el efecto corona sobre toda la longitud de estos electrodos. Los electrodos de emisión se encuentran conectados al polo negativo del rectificador de alta tensión, mientras que las placas colectoras están conectadas al polo positivo o conector común de puesta a tierra, grandes cantidades de iones positivos y negativos se comienzan a formar por el efecto corona. Los Iones negativos son atraídos por las placas positivas por la fuerza creada por el campo y los iones positivos deben atravesar el espacio total entre electrodos para alcanzar la parte negativa más próxima (ALSTOM,1995).

Para remover la ceniza y polvo colectado, se cuenta con un sistema de golpeo, accionado por

motores reductores aislados eléctricamente, que proporcionan movimiento al eje motriz para que los martillos rotativos transmitan una onda de choque periódica a los marcos porta electrodos, para soltar estas partículas colectadas y precipitarlas hacia las tolvas para su posterior evacuación. El gas limpio que atraviesa la sección de los campos es dirigido a parrillas de salida, que distribuyen el flujo de gas hacia la dirección de las chimeneas (ALSTOM,1995).

Los PES de las dos unidades generadoras cuentan con cuatro campos, cada uno es controlado por un transformador rectificador de alta tensión que transforma un voltaje en AC de 480 V a 95 kV en DC y cuentan con una eficiencia específica que depende del diseño. En las unidades generadoras de Termoguajira la eficiencia de cada campo semuestra a continuación:

Tabla 1

Eficiencia teórica de los campos 1 y 4

UNIDAD I			UNIDAD II		
<i>Campo</i>	<i>Concentración polvo</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Campo</i>	<i>Concentración polvo</i>	<i>Eficiencia</i>
1	10,5 g/Nm ³	70% a 80%	1	4,25 g/Nm ³	70% a 80%
2	-	-	2	-	-
3	-	-	3	-	-
4	80 mg/Nm ³	99,2%	4	80 mg/Nm ³	98,8%

Nota. Esta tabla muestra la eficiencia en los campos, dato indicado por el fabricante. Fuente: Manual de operación y mantenimiento ALSTOM POWER

3.2 Componentes

Los PES instalados en las unidades generadoras de Termoguajira son del tipo placa-electrodo,

están constituidos por elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos, a continuación, se listan algunos componentes que conforman estos equipos:

Figura 2

Esquema de los componentes de los precipitadores electrostáticos

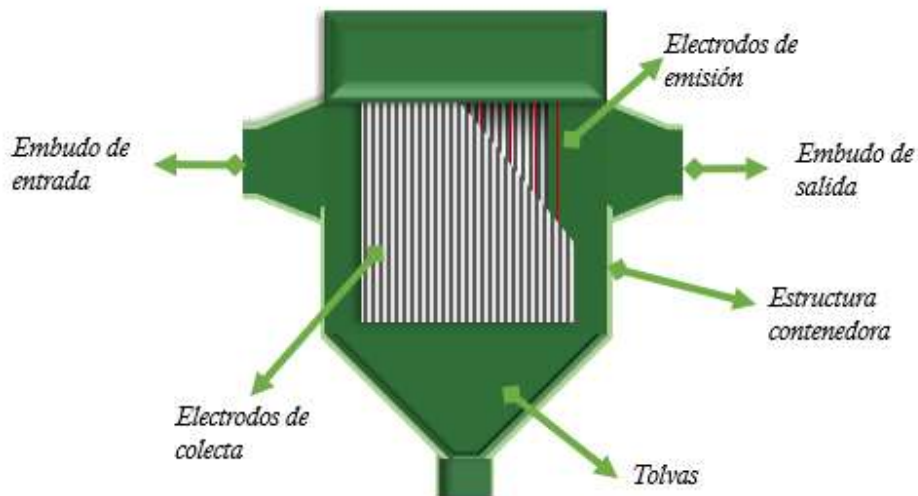


Tabla 2

Función de los componentes principales de los PES

COMPONENTE	FUNCION
Estructura contenedora	Cubrir y soportar todo los componentes internos y externos del PES.
Embudo de entrada y salida	Alojar las parrillas de entrada y salida de distribución.

Parrilla de distribución de gases (entrada y salida)	Distribuye el flujo de gas a velocidad constante en el interior del campo.
Puertas de Inspección	Puerta de acceso para inspeccionar el interior del precipitador.
Placas colectoras	Colectar la ceniza ionizada para precipitarla hacia tolvas.
Tolva	Contener temporalmente la ceniza colectada para posteriormente evacuarla.
Aislador soporte	Aislar los marcos porta electrodos.
Transformador Rectificadores	Convertir la corriente alterna en corriente continua.
Electrodos de emisión	Generar el efecto corona para ionizar las partículas del gas.
Controlador EPIC III	Unidad de control para regular y controlar los precipitadores.
Sistema de golpeo	Emitir ondas de choque a los marcos porta electrodos para retirar la ceniza de la superficie.

4. Análisis estadístico de confiabilidad

La confiabilidad operacional se define como un conjunto de procesos de mejoramiento continuo, que reúne de manera sistémica, avanzadas herramientas de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la productividad industrial (García, O. 2007).

La información para el desarrollo del análisis estadístico de los PES es extraída del software de Mainsaver de Termoguajira. Para ello, se ingresa la taxonomía de los precipitadores para acceder al historial de mantenimiento:

Figura 3

Datos en Mainsaver del equipo en las unidades I y II.

No. de OT	Trabajo Requerido	No. de KKS	Descripcion Breve del Activo	Status	Responsable del Activo	Clase de Trabajo	Sintoma de Falla	Fecha de Origen	Fecha de Vencimiento Planeado	Prioridad
C153242	RESISTENCIAS AQUE DE CAMARA B DE PRECIPITADOR DE U2, NO ENTRAN E/S.	TG2BF800BN0034	GRUPO DE CALENTAMIENTO DE ELECTRODOS AQUE CAMARA B PRECIPITADOR	CLO	ELE	ELE	FTS	2/9/2019	02/15/2019	A
C153410	mantenimiento preventivo de caseta de aire acondicionado precipitador u1	TG1SAI00AA0017	AIRE ACONDICIONADO PRECIPITADOR ELECTROSTATICO MARCA LEN CLO	CLO	MEC	SER		2/25/2019	03/27/2019	P
C153411	mantenimiento preventivo en la caseta de aire acondicionado precipitador u2	TG2SA00AA0027	AIRE ACONDICIONADO PRECIPITADOR ELECTROSTATICO MARCA LEN CLO	CLO	MEC	SER		2/25/2019	03/27/2019	P
P130955	panel de control sistema de co2 precipitador u2: 1. inspeccion en estacion de ch	TG2SG40PC0032	PANEL DE CONTROL SISTEMA CO2 CASETA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	IYC	ELE		3/6/2019	03/06/2019	P
C153557	tolva dv1-9 sistema ceniza volatil : esta obstruida por objeto extraño que impide	TG1ETG30VV3901	VALVULA DV1-9 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	MEC	PLU	3/7/2019	03/07/2019	E
C153558	tolva dv2-17 sistema ceniza volatil : esta obstruida con objeto metalico: destapa	TG2ETG50VV3956	VALVULA DV2-17 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	MEC	PLU	3/7/2019	03/14/2019	A
C153609	TOLVA DV2-12 DE LOS PE U2 : PRESENTA VALVULA OBSTRUIDA	TG2ETG40VV3956	VALVULA DV2-12 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	MEC	PLU	3/14/2019	03/14/2019	E
C153611	TOLVA DV2-16 DE LOS PE U2 : PRESENTA VALVULA OBSTRUIDA : REVISION	TG2ETG50VV3961	VALVULA DV2-16 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	MEC	PLU	3/14/2019	03/14/2019	E
C153508	valvula rg1-6 sistema ceniza volatil revisar no abre	TG1ETG40VV3906	VALVULA RG1-6 DESCARGA DE SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR	CLO	MEC	MEC	FTO	3/6/2019	03/06/2019	E
C153512	tolva dv1-5 esta obstruida con objeto extraño se necesita desacoplar linea par	TG1ETG20VV3896	VALVULA DV1-5 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	IYC	MEC	PLU	3/6/2019	03/12/2019	A
C153751	RG27 VALVULA SISTEMA CENIZA LIVIANA U2: PERDIDA DE VACIO POR DESGATE	TG2ETG50VV3942	VALVULA RG2-7 DESCARGA DE SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR	CLO	MEC	SER		3/27/2019	04/26/2019	P
C153753	VALVULA DV2-16 DE LOS PE U2 : ESTÁ OBTRUIDA POR OBJETO EXTRAÑO	TG2ETG50VV3960	VALVULA DV2-16 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	SER		3/27/2019	04/03/2019	A
C153642	DESATASCAR, ESTA OBSTRUIDA	TG1ETG20VV3897	VALVULA DV1-6 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	MEC	PLU	3/18/2019	03/18/2019	E
C153647	Ajustar piston suelto. Revisar, normalizar y aseguramiento de correcto funcione	TG2ETG30VV3953	VALVULA DV2-9 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	IYC	DOP	3/18/2019	03/18/2019	E
C153650	Ajustar disco, presenta perdida de vacio al no sellar completamente. Revisar, n	TG1ETG20VV3896	VALVULA DV1-5 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	IYC	MEC	FTC	3/18/2019	03/18/2019	E
C153708	LA VALVULA ESTA QUEDANDO ABIERTA, TUMBA EL VACIO, REVISAR	TG1ETG20VV3896	VALVULA DV1-5 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	IYC	MEC	NL	3/24/2019	04/23/2019	P
C153736	GRUPO DE RESISTENCIAS CAMARA B PE U2: SE DISPARAN REVISAR1: realiza TG2BF800BN0034		GRUPO DE CALENTAMIENTO DE ELECTRODOS AQUE CAMARA B PRECIPITADOR	CLO	ELE	ELE	FTS	3/26/2019	04/25/2019	P
C153739	Campo 1A1 no entra en servicio.1.Realizar ast y sacar libranza2. Inspeccion in	TG1HDE10EP0001	PRECIPITADOR ELECTROSTATICO CÁMARA A U1	CLO	ELE	ELE	SER	3/26/2019	04/25/2019	P
C153741	VALVULA RG2-4 DEL SISTEMA DE BARRIDO DE CENIZA, REVISAR, SE ESTA PE	TG2ETG20VV3939	VALVULA RG2-4 DESCARGA SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR	CLO	MEC	MEC	ELU	3/26/2019	04/25/2019	P
C153344	tolva dv2-14 precipitadores u2 : esta rota provocando salida de ceniza por lo q	TG2ETG50VV3958	VALVULA DV2-14 SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR ELECTRO CLO	CLO	MEC	MEC	ELP	2/19/2019	03/21/2019	P
C153549	valvula rg2-5 sistema ceniza liviana: esta pegadano acciona	TG2ETG30VV3940	VALVULA RG2-5 DESCARGA DE SISTEMA CENIZA LIVIANA PRECIPITADOR	CLO	MEC	MEC	SPO	3/7/2019	03/07/2019	E

Nota. El gráfico muestra las ordenes de trabajo de mantenimiento realizado a los precipitadores electrostáticos. Fotografía reproducida con permiso de Termoguajira, GECELCA S.A.

Este cuenta con comandos que permiten exportar en formato Excel toda la información permitiendo organizar y filtrar los datos necesarios para el análisis. En la figura se observa las siguientes columnas importantes a resaltar:

No de la orden de trabajo (OT): Orden de trabajo creada y programada por el área de mantenimiento, dirigida al área competente ya sea eléctrica, mecánica, servicios técnicos, instrumentación y control cuando se requiere intervenir un activo.

Trabajo requerido: Descripción del trabajo que se requiere realizar a un activo en específico, este es reportado por el personal que opera la planta, que monitorea en campo el comportamiento de los equipos.

No de KKS: Es la taxonomía de los activos, en él se puede identificar la ubicación del equipo, es decir, si se encuentra ubicado en la unidad I o la unidad II, y el grupo al cual pertenece.

Descripción breve del activo: Indicación específica del activo a intervenir.

Status: Estado de la OT, este dato es ingresado por el área asignada para realizar la OT de acuerdo la etapa de su ejecución.

Responsable del activo: Área competente asignada para la realización de la OT.

Clase de trabajo: Indica si el trabajo corresponde al área de taller eléctrico, taller mecánico, servicios técnicos o instrumentación y control.

Fecha de origen: Fecha de creación de la OT.

Fecha de vencimiento: Fecha en la cual se reporta que se finalizó la realización de la OT.

También cuenta con apartados de los repuestos usados, el costo asociado a ellos y a la mano de obra, pero se observa que estos datos son imprecisos e incompletos, no se cuenta diligenciado en la totalidad de OTS, por lo cual para efectos de este análisis no se tendrán en cuenta.

Antes de realizar el análisis de confiabilidad, se selecciona y recolecta la información realmente válida. Principalmente se usan datos de fallas que describan pérdida parcial o total de la función, se observó que, en general, por circunstancias, el personal, situaciones adversas la información no se registró con precisión, lo que conllevó a leer cada OT registrado eligiendo la que describen acciones correctivas y actividades preventivas realizadas cuando se reporta o encuentra una anomalía parcial.

Mainsaver cuenta con información de las actividades de mantenimiento realizadas por el área de mantenimiento registradas desde la adquisición de los PES en 1999 hasta la actualidad, el análisis se realiza con los datos de los precipitadores de la unidad I y unidad II en conjunto, ya que son de la misma marca, prestan el mismo servicio y su diseño es igual, por lo que se convino realizar el análisis estadístico de igual forma para cada activo. Entre los limitantes se encontró que al no contarse en la base de datos con las particiones de los sistemas y subsistemas de los activos de una manera organizada y estandarizada el cálculo de la confiabilidad se realiza de los PES en conjunto.

Figura 4*Datos de Mainsaver exportados.*

C100924	TG1HDE10EP0001	CORR	SER	U	CLO	25/05/1999	29/02/2000	6720	Casing	REPARAR	CUBIERTA	Precipitador: SE LEVANTARON LAS LAMINAS
C100927	TG1HDE10EP0001	CORR	SER	P	CLO	26/05/1999	25/09/1999	2928	Casing	REPARAR	CUBIERTA	REPARACION REPARACION ELECTRICA. SE HIZO
C101143	TG2HDE30EP0003	PREV		R	CLO	10/06/1999	12/07/1999	768	Casing	REEMPLAZAR	Ducto de entrac	Inspeccion e REVISION INTERNA, SE SUAVIZO
C102462	TG2HDE10EP0004	PREV		I	CLO	20/10/1999	23/12/1999	1536	Casing	REEMPLAZAR	Ducto de entrac	precipitador LIMPIEZA Y REVISION INTERNA
C103006	TG1HDE30EP0002	CORR	ERO	U	CLO	1/12/1999	2/01/2000	768	Placas Colect	LIMPIAR	SISTEMA DE	campo B3 re SE REVISO EL CAMPO B3 Y PRE
C103224	TG1HDE10EP0001	CORR	SER	P	CLO	23/12/1999	7/01/2000	360	Empaque	CAMBIAR	MAN HOL	man hol de Se le cambiaron los empaques
C103430	TG1HDE10EP0001	PREV		I	CLO	5/01/2000	7/01/2000	48	Aislador	LIMPIAR	AISLADORES	precipitador: INSPECCIONAR:: SE REVISO PAF
C103504	TG1HDE10EP0001	CORR	ERO	E	CLO	12/01/2000	13/01/2000	24	Fusible	REEMPLAZAR	LAZO DE CON MEDIR AISLA SE LE APLICO TENSION AL CAMP	
C103528	TG1HDE10EP0001	CORR	LOU	U	CLO	13/01/2000	17/01/2000	96	EPIC	REEMPLAZAR	CONEXIONES	Campo A3 re Se intercambio tarjeta A1 con la
C103544	TG1HDE30EP0002	CORR	FTS	U	CLO	15/01/2000	27/01/2000	288	Ventilador D	REEMPLAZAR	LAZO DE CON ventilador de EL VENTILADOR ESTA QUEMADO	
C103706	TG1HDE10EP0001	CORR	SER	U	CLO	27/01/2000	29/01/2000	48	Semiconduc	REEMPLAZAR	LAZO DE CON REVISION DE	Revisadas Falta Repuesto y Plar
C103950	TG2HDE10EP0004	PREV		I	CLO	18/02/2000	21/02/2000	72	Fusible	REEMPLAZAR	LAZO DE CON	inspeccion d MANTENIMIENTO PREVENTIVO
C104027	TG2HDE30EP0003	CORR	FTS	I	CLO	27/02/2000	27/02/2000	0	CONTACTOR	LIMPIAR	LAZO DE CON CAMPO B1 P SE ENCONTRO EL CONTACTOR S	
C104106	TG1HDE10EP0001	CORR	PLU	I	CLO	8/03/2000	6/04/2000	696	TUBERIA	CAMBIAR	SISTEMA DE	TUBOS CAPS Se suavizaron los tapones, se co
C104110	TG2HDE30EP0003	CORR	STD	I	CLO	8/03/2000	6/04/2000	696	Casing	REPARAR	CUBIERTA	MANHOLES (Se le colocaron sobresanos en I
T100063	TG1HDE10EP0001	PREV		P	CLO	26/07/2000	12/08/2000	408	Aislador	LIMPIAR	AISLADORES	precipitador: SE ENCONTRARON QUE EN EL IN
T100063	TG1HDE10EP0001	PREV		P	CLO	26/07/2000	12/08/2000	408	Electrodos D	AJUSTAR	SISTEMA DE	precipitador: SE ENCONTRARON QUE EN EL IN
T100063	TG1HDE10EP0001	PREV		P	CLO	26/07/2000	12/08/2000	408	Placas Colect	REPARAR	SISTEMA DE	precipitador: SE ENCONTRARON QUE EN EL IN

La información exportada es organizada en orden de fecha, desde la actividad más antigua a la más reciente, los datos incompletos, incorrectos y no pertinentes fueron eliminados, de cada OT se identificó, añadió y organizó columnas indicando la parte intervenida (subsistema), el componente (sistema) del cual constituye la parte intervenida y la falla funcional correspondiente. Hecha la limpieza se procede a calcular el tiempo de reparación en horas, factor que es calculado por (2), dato que fue calculado y añadido.

$$\text{Tiempo de reparación} = (\text{Fecha de terminación de OT} - \text{Fecha de origen OT}) \times 24 \text{ [horas]} \quad (2)$$

El siguiente paso es organizar de mayor a menor el campo de las horas de reparación, es añadida una columna para cuantificar la cantidad de datos consignados de manera horizontal. Se obtiene que para los precipitadores de la unidad I y unidad II de la termoeléctrica Termoguajira a analizar hay un total de 144 datos.

Se aplica el método de Duane para obtener una descripción previa del comportamiento del mantenimiento implementado esto descrito con el historial de tiempo de reparación y así obtener un panorama de las mejoras a aplicar a las actividades de mantenimiento. Luego se conoce el

comportamiento inicial de las horas aplicando la función de densidad, para continuar aplicando las distribuciones de densidad normal, log normal, y Weibull 2P.

4.1 Crow Amsaa o crecimiento de la confiabilidad

El análisis de CROW AMSAA llamado crecimiento de la confiabilidad fue desarrollado por James T. Duane (1981), para medir y analizar el comportamiento de los procesos y estrategias del mantenimiento y determinar la mejora o empeoramiento en la operación y producción de plantas industriales (Fuerza aérea colombiana, 2020).

De acuerdo al cálculo de la variable β , determinada con las horas de reparación es posible obtener un primer escenario del comportamiento del plan de mantenimiento actual y en base a ese escenario plantear un primer paso en la mejora de la gestión del activo. Mohammad Modarres (1999) afirma que “Estudios empíricos realizados por Duane (1964) sobre una serie de sistemas reparable han demostrado que el MTBF acumulativo graficado contra el tiempo acumulativo en la prueba en un espacio logarítmico exhibe una relación casi lineal”. Para efectos de este estudio se calculará el tiempo medio entre reparaciones MTTR acumulativo, parámetro calculado mediante (3), t representa las horas acumuladas de reparaciones de los PES y N indica la cantidad de datos.

$$\theta_c(t) = \frac{t}{N} \quad (3)$$

Según los datos obtenidos se le puede dar interpretación de acuerdo a la siguiente imagen:

Tabla 3*Interpretación del Método de Daune*

β	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.

Nota. Tomado de *Reliability Engineering and Risk Analysis* (p 319), por M. Modorres, M.

Kaminskiy, V. Krivtsov, 1999, CRC Press.

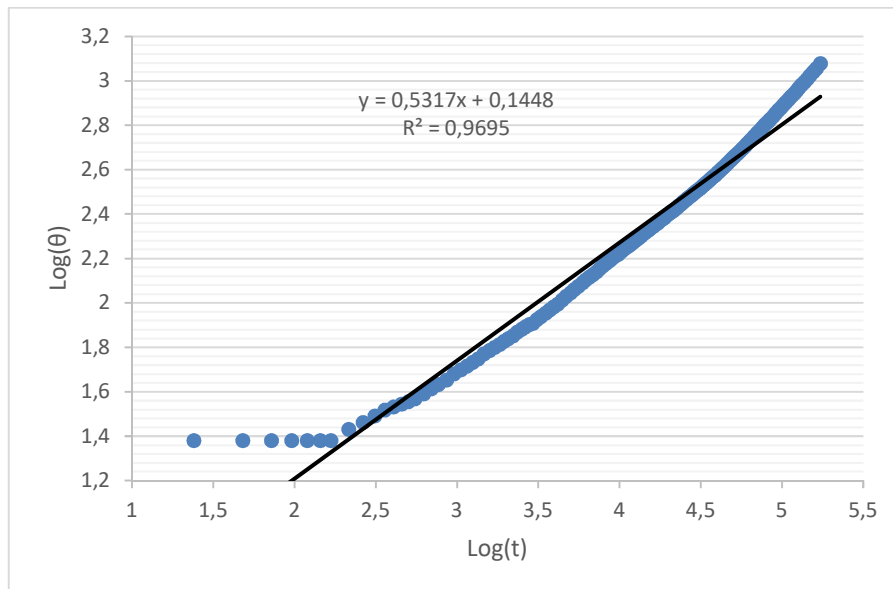
A continuación, la Tabla 4 permite evidenciar los primeros 21 datos analizados

Tabla 4

Muestra de los 21 primeros datos calculados con las variables del método de Duane

No de datos (N)	Horas de reparación	Horas de reparación acumuladas(t)	$\Theta = (t/N)$	$\log(t)$	$\log(\theta)$
1	24	24	24	1,38021124	1,38021124
2	24	48	24	1,68124124	1,38021124
3	24	72	24	1,8573325	1,38021124
4	24	96	24	1,98227123	1,38021124
5	24	120	24	2,07918125	1,38021124
6	24	144	24	2,15836249	1,38021124
7	24	168	24	2,22530928	1,38021124
8	48	216	27	2,33445375	1,43136376
9	48	264	29	2,42160393	1,462398
10	48	312	31	2,49415459	1,49136169
11	48	360	33	2,5563025	1,51851394
12	48	408	34	2,61066016	1,53147892
13	48	456	35	2,65896484	1,54406804
14	48	504	36	2,70243054	1,5563025
15	48	552	37	2,74193908	1,56820172
16	72	624	39	2,79518459	1,59106461
17	72	696	41	2,84260924	1,61278386
18	72	768	43	2,88536122	1,63346846
19	96	864	45	2,93651374	1,65321251
20	96	960	48	2,98227123	1,68124124
21	96	1056	50	3,02366392	1,69897

Donde el parámetro β es el factor más importante en este análisis, es denominado factor de forma porque es la pendiente que representa el comportamiento de los datos en la gráfica denominado rata de falla (Fuerza aérea colombiana, 2020).

Figura 5*Método de Daune*

El resultado obtenido es $\beta=0,5317$, que, de acuerdo a la tabla de interpretación, la rata de falla se encuentra entre 0.4 - 0.6 por lo cual, la interpretación directa es que el plan de mantenimiento no previene las fallas, se centra a la eliminación de los modos de falla una vez reportados.

4.1.1 Función de densidad de probabilidad

Para el análisis es importante conocer el comportamiento inicial de los tiempos de reparación en el transcurso de la vida de los activos, para ello se realiza un histograma inicial de distribución de densidad de frecuencia acumulada (PDF). Se utiliza Excel para graficar las particiones determinados con el intervalo de clase, con ancho de clase 9

Tabla 5

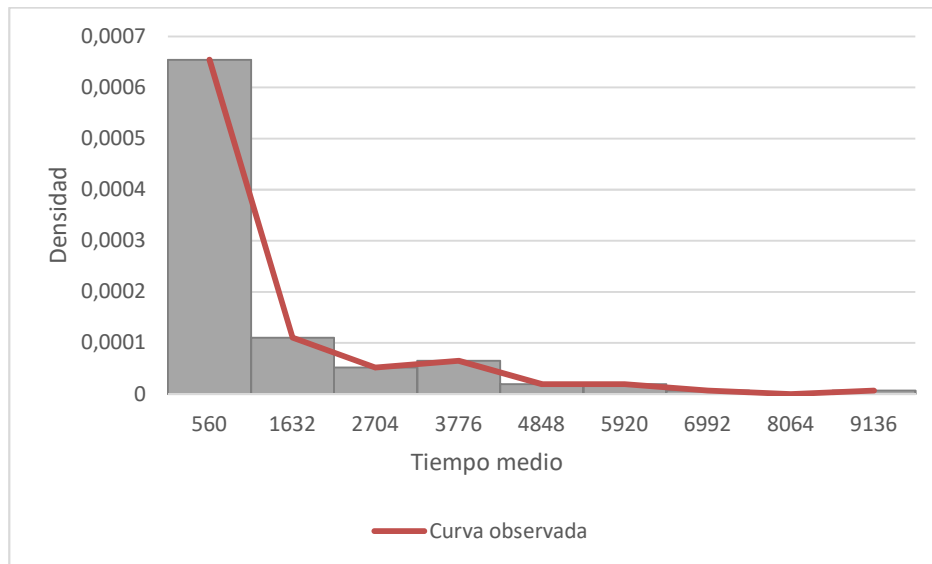
Particiones para hallar el PDF a partir de las horas de reparación de los Precipitadores de Termoguajira

No	Intervalo	Intervalo	Tiempo	CONTEO
Particiones	Min	Max	Medio	
1	24	1096	560	101
2	1096	2168	1632	17
3	2168	3240	2704	8
4	3240	4312	3776	10
5	4312	5384	4848	3
6	5384	6456	5920	3
7	6456	7528	6992	1
8	7528	8600	8064	0
9	8600	9672	9136	1

Del histograma de la Figura 5 podemos concluir que los datos tienden a describir una distribución asimétrica a la derecha encontrándose con que se concentra la mayor cantidad de información al inicio. Es necesario aplicar pruebas de normalidad para determinar el comportamiento real de las fallas.

Figura 6

Histograma de densidad de frecuencia acumulada



4.2 Modelos estadísticos

Ahora, se implementan tres modelos estadísticos para describir el comportamiento real del historial de los tiempos de reparación de los precipitadores, y luego seleccionar el que mejor se ajuste a los datos. Se emplea la distribución Normal, Log normal y Weibull de dos parámetros.

4.2.1 Distribución normal

La distribución normal también conocida como de Gauss o Laplace se usa en todos los campos de la experimentación, sirve para describir los fenómenos de envejecimiento de equipos, modelos de fatiga y fenómenos naturales (Mora, 2009). La función de la PDF normal corresponde a la función:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

Los parámetros μ y σ representan la media y la desviación estándar respectivamente. La media es calculada mediante (5):

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

Donde N = Número total de datos y x_i = Horas de reparación reportadas. Para N = 144 y las horas de reparación indicadas en la tabla 5, al reemplazar los valores en (4) se obtiene:

$$\mu = 1195$$

La desviación estándar muestral se calcula mediante (6):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (6)$$

Al reemplazar en (6), N = 144, $\mu = 1642.9$ y las horas de reparación indicadas en la tabla 4 se obtiene:

$$\sigma = 1642.9$$

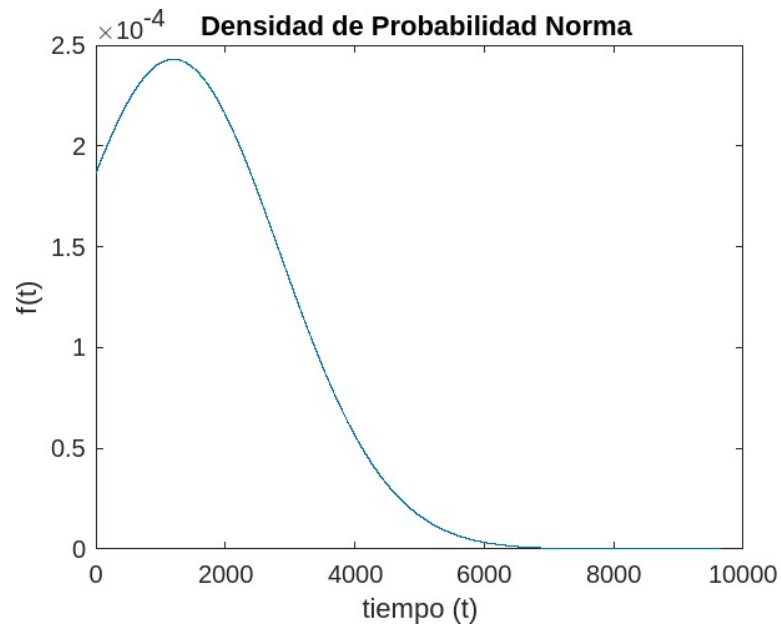
4.2.1.1 Función de densidad de probabilidad Normal (PDF) f(t).

Al reemplazar los valores de μ y σ en la ecuación (4), y graficando la ecuación.

$$\mu = 1195$$

$$\sigma = 1642.9$$

$$f(t) = \frac{1}{1642.9\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-1195}{1642.9}\right)^2\right\}$$

Figura 7*Función $f(t)$ de la distribución Normal***4.2.1.2 Función de probabilidad de falla (Desconfiabilidad) Normal $F(t)$.**

La función desconfiabilidad $F(t)$ para el modelado normal es calculada por la ecuación (7), sustituyendo los valores μ y σ , y graficando la ecuación.

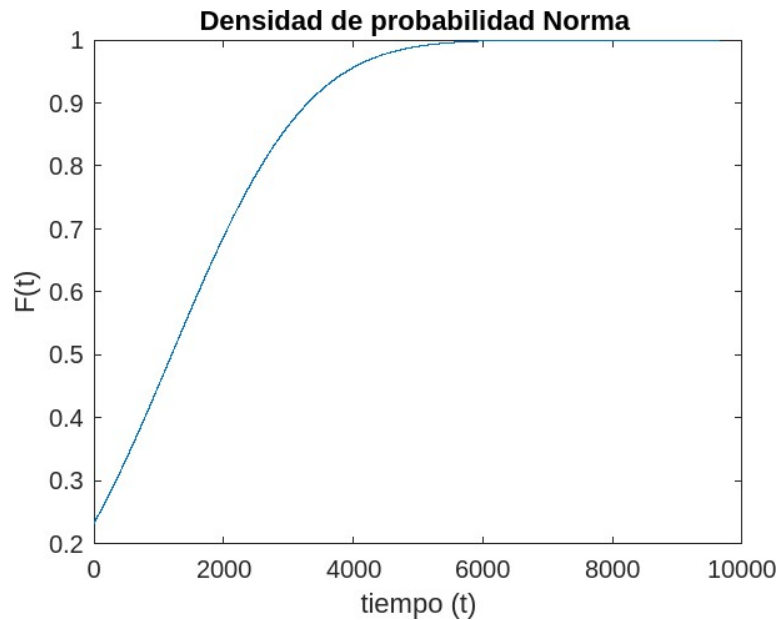
$$\mu = 1195$$

$$\sigma = 1642.9$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp^{-\left(\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} dt \quad (7)$$

Figura 8

Función $F(t)$ de la distribución Normal



4.2.1.3 Función de confiabilidad de Normal $R(t)$.

La función de confiabilidad para el modelado normal $R(t)$ calculado mediante la ecuación (8), reemplazando los valores μ y σ , y graficando la ecuación.

$$\mu = 1195$$

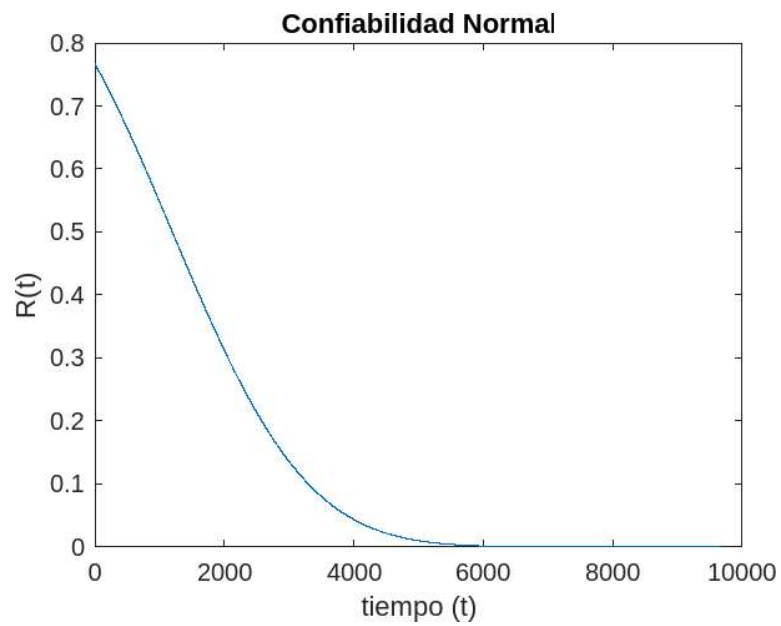
$$\sigma = 1642.9$$

$$R_{(t)} = 1 - F_{(t)} \quad (8)$$

Al graficar $R_{(t)}$

Figura 9

Función $R(t)$ de la distribución Normal

**4.2.1.4 Función Hazard o Tasa de riesgo Normal $h(t)$.**

La tasa de riesgo $h(t)$ para el modelo normal calculado mediante la ecuación (9), reemplazando los valores μ y σ , y graficando la ecuación

$$\mu = 1195$$

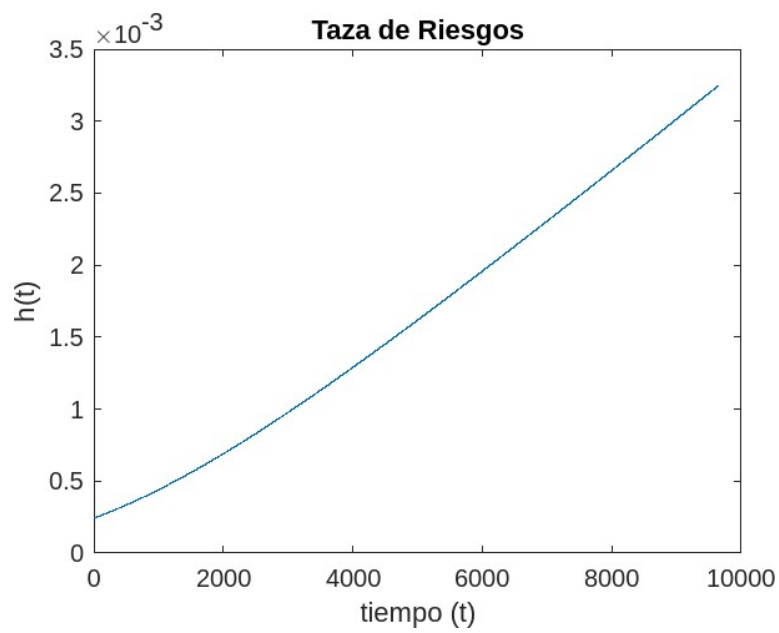
$$\sigma = 1642.9$$

$$h_{(t)} = \frac{f_{(t)}}{R_{(t)}} \quad (9)$$

Graficando la función se obtiene:

Figura 10

Función $h(t)$ de la distribución Normal



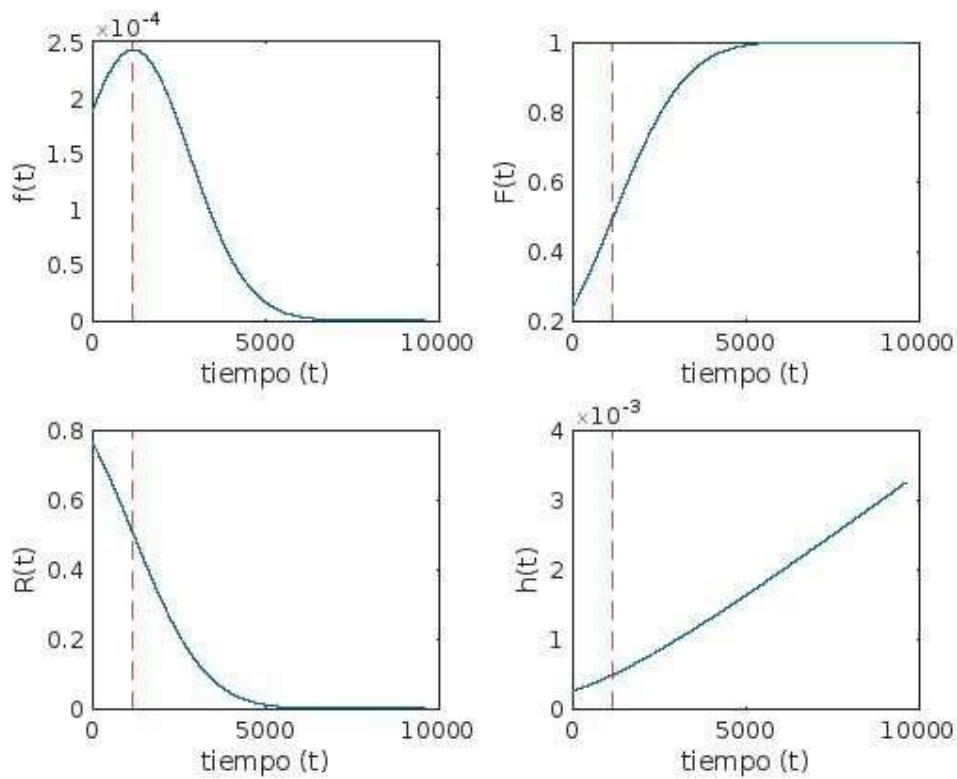
4.2.1.5 Tiempo medio entre reparaciones MTTR.

La expresión (10) representa el tiempo medio entre reparación para una distribución normal con valores μ y σ está dada por la función:

$$MTTR = \mu = 1195 \text{ h (10)}$$

Figura 11

Representación de MTTR para cada función de densidad



4.2.2 Distribución de Weibull de dos parámetros

La distribución de Weibull es de gran utilidad debido a que presenta variedad de formas que permiten ajustarse a distintos patrones de datos, especialmente los relacionados con la vida útil de los productos o equipos (Moubray, J, 2004).

Con ella se busca encontrar el parámetro de forma y concluir el estado en que se encuentran los activos, para determinar los parámetros de la función se implementa el método de mínimos cuadrados (Espinosa, J, Rativa, E. 2021).

4.2.2.1 Mínimos cuadrados.

Existen diversos métodos para la estimación de los parámetros de la distribución, para efecto de este estudio se utilizará la metodología de mínimos cuadrados. Se implementa la función de la forma $Y = mX + b$, para determinar los parámetros de forma β y el parámetro de escala η (Rativa & Espinosa, 2021).

4.2.2.1.1 Cálculo de la variable x .

La variable x es calculada mediante el logaritmo natural de las horas de falla dada por la ecuación (11)

$$x_i = \ln(\text{horas reparación})_i \quad (11)$$

donde i corresponde al número de cada dato en la cantidad total de información

4.2.2.1.2 Cálculo variable y .

La variable y , primero se debe calcular los rangos medios mediante la ecuación (12), para el caso se aplica las aproximaciones de Bernand (Rativa & Espinosa, 2021).

$$\text{Bernand Median (BM)} = \text{Rangos Medios} = \frac{i-0.3}{N-0.4} \quad (12)$$

donde i corresponde al número de cada dato en la cantidad total de información y N es la cantidad total de datos.

A continuación, el cálculo de rangos medios en la ecuación

$$y_i = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)_i} \right) \right] \quad (13)$$

Donde:

Ln = logaritmo natural y F(t) = Rangos medios.

4.2.2.1.3 *Regresión lineal.*

Las variables calculadas de x y y , Weibull permite representar la curva por una línea recta mediante la metodología de alineación por mínimos cuadrados, dada por la ecuación, $Y = mX + a$ (14), convirtiendo los datos a escala logarítmica.

La ecuación (15) permite el cálculo del parámetro de forma ($\beta = m$)

$$\beta = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (15)$$

Siendo n la totalidad de datos, al reemplazar cada uno de los valores de x y y , se obtiene

$$\beta = 0.8331$$

El parámetro de intercepto con el eje “y” denominado a , está dado por la ecuación (16)

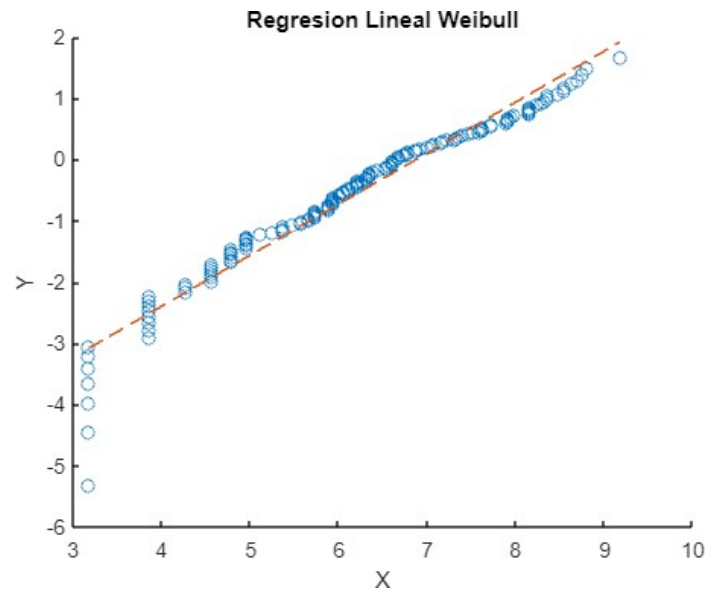
$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (16)$$

al reemplazar cada uno de los valores de x y y , se obtiene

$$a = -5.7326$$

La ecuación que describe la línea recta de la regresión lineal en la Figura es:

$$Y = 0.8331X - 5.7326$$

Figura 12*Regresión lineal de Weibull*

La interpretación del valor del factor de forma de la distribución de Weibull obtenido, se realiza siguiendo la curva de bañera o de Davies, para $\beta = 0.8331$, se sitúa en la primera fase o de mortalidad infantil que como se observa en la gráfica PDF tiende a tener una tasa de falla decreciente. Este comportamiento puede ser debido a distintas causas (Moubray, J. 2004).

Moubray en el libro RCM II indica algunas causas de este comportamiento las cuales se listan a continuación:

- Mal diseño
- Mala calidad de fabricación
- Instalación incorrecta.
- Delegado incorrectamente.

- Operación incorrecta.
- Mantenimiento innecesario.
- Mantenimiento excesivamente invasivo.
- Mal manejo del personal.

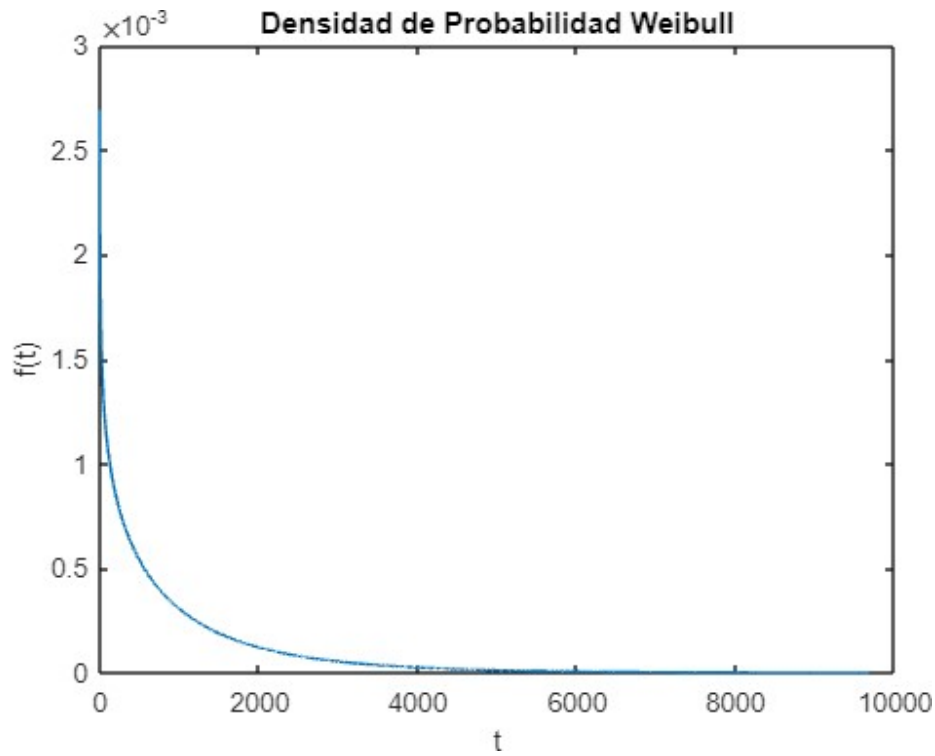
Para el cálculo del parámetro de escala Eta (η), dado por la ecuación (17)

$$\eta = e^{\left(\frac{a}{-\beta}\right)} = e^{\left(\frac{-5.7326}{-0.8331}\right)} = 971.5023 \quad (17)$$

4.2.2.2 Función de densidad de probabilidad de Weibull (PDF) $f(t)$.

La ecuación (18) permite el cálculo de la densidad de probabilidad para la distribución de Weibull, reemplazando los valores de $\beta = 0.8331$ y $\eta = 971.5023$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo.

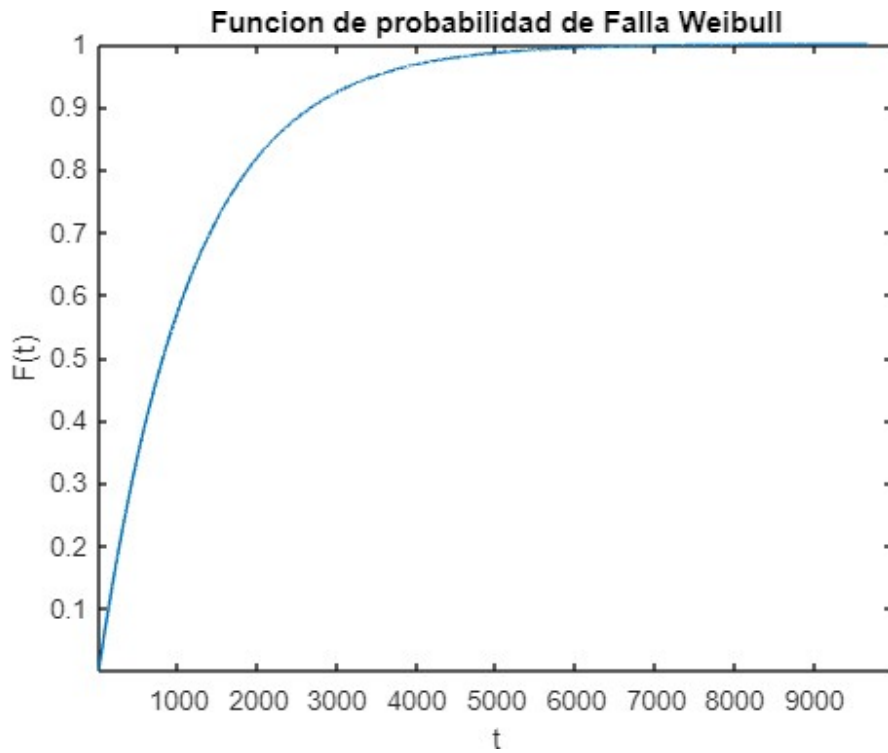
$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (18)$$

Figura 13*Función $f(t)$ de Weibull*

4.2.2.3 Función de probabilidad de falla (Desconfiabilidad) de Weibull $F(t)$.

La ecuación de probabilidad de falla $F(t)$ para la distribución de Weibull descrita por (19), reemplazando los valores de $\beta = 0.8331$ y $\eta = 971.5023$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo t :

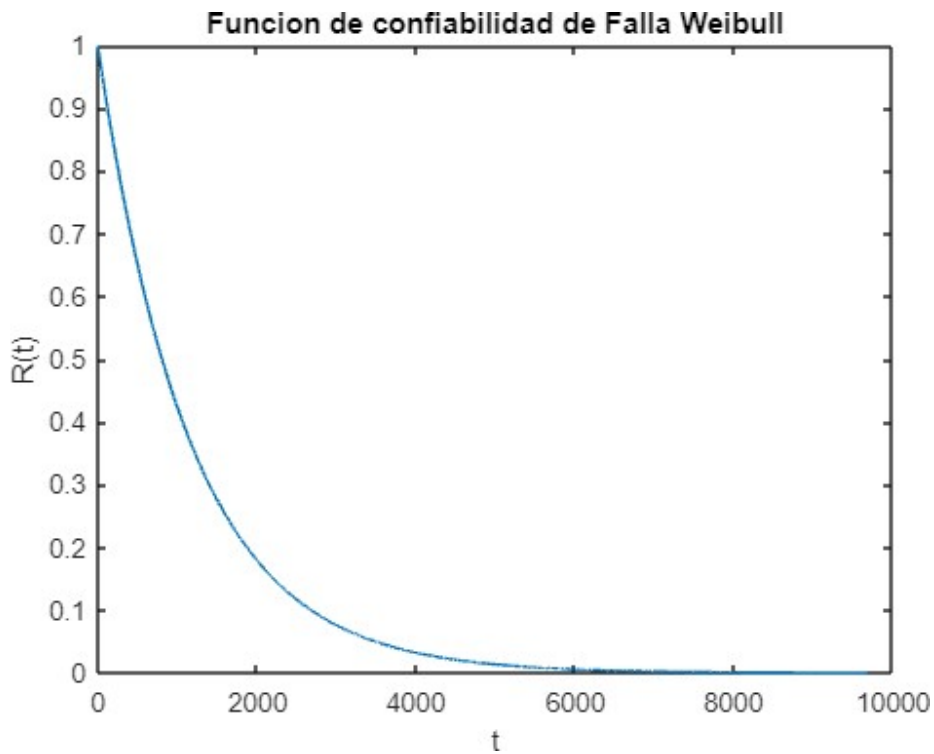
$$F_{(t)} = \int_{-\infty}^t f_{(t)} dt = 1 - e^{\left(\left(\frac{-t}{\eta}\right)^{\beta}\right)} \quad (19)$$

Figura 14*Función F(t) de Weibull*

4.2.2.3.1 *Función de confiabilidad de Weibull R(t).*

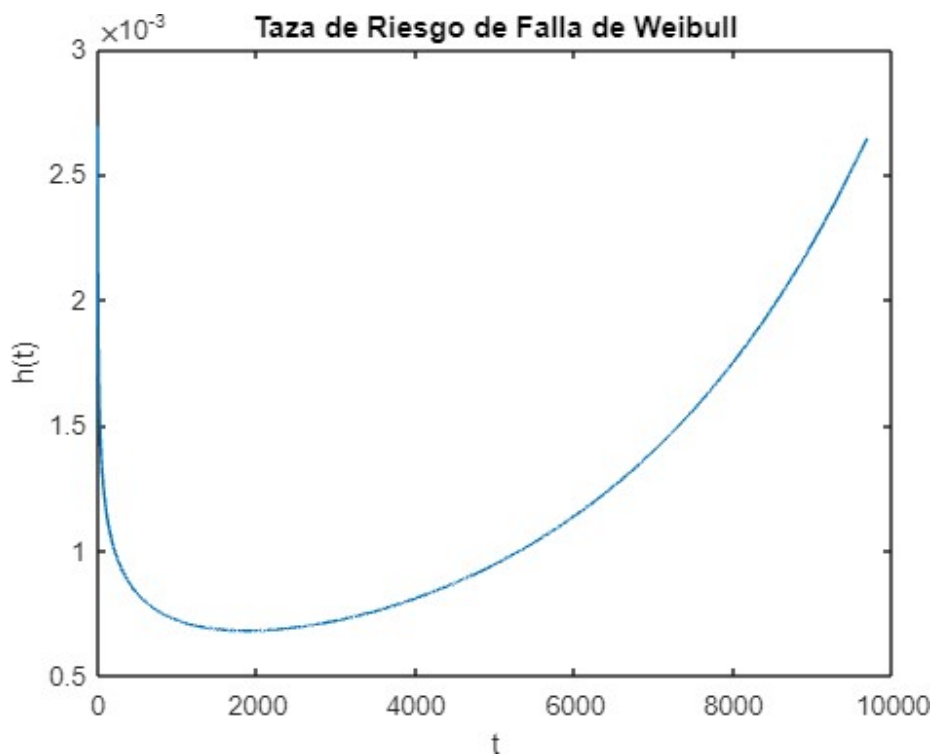
La ecuación (20) permite el cálculo de la confiabilidad $R(t)$ para la distribución de Weibull, reemplazando los valores de $\beta = 0.8331$ y $\eta = 971.5023$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo t :

$$R_{(t)} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (20)$$

Figura 15*Función R(t) de Weibull***4.2.2.4 Función Hazard o tasa de riesgo de Weibull $h(t)$.**

La ecuación (21) permite el cálculo de la tasa de riesgo $h(t)$ para la distribución de Weibull, reemplazando los valores de $\beta = 0.8331$ y $\eta = 971.5023$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo t :

$$h_{(t)} = \frac{f_{(t)}}{R_{(t)}} \quad (21)$$

Figura 16*Función $h(t)$ de Weibull.***4.2.2.5 MTTR tiempo medio entre reparaciones.**

La ecuación (22) representa el tiempo medio entre reparaciones para una distribución Weibull, reemplazando los valores de $\beta = 0.8331$ y $\eta = 971.5023$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo t:

$$MTTR = \eta \Gamma \left[1 + \frac{1}{\beta} \right] \quad (22)$$

$$MTTR = 971.5023\Gamma\left[1 + \frac{1}{0.8331}\right]$$

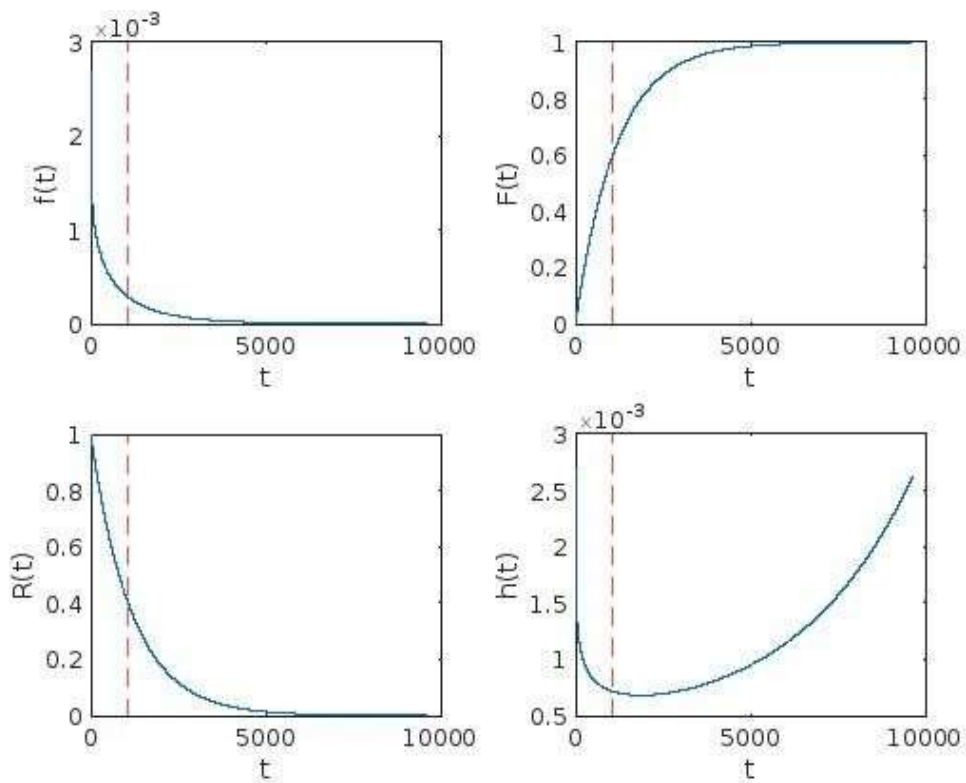
Donde la ecuación (23) permite el cálculo la función Gamma

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} x^{t-1} e^{-x} dx \quad (23)$$

$$MTTR = 1070.4 \text{ horas}$$

Figura 17

Representación de MTTR para cada función de densidad



4.2.3 Distribución Log normal

La última distribución aplicada es la Log normal, la cual es una variante de la distribución normal. También se genera a partir de los parámetros μ y σ , pero en este caso no representan la media y la desviación estándar de la variable de tiempo, sino su logaritmo (Mora,2009). La función PDF para esta distribución es calculada mediante la ecuación (24):

$$f(t) = \frac{1}{(\sigma_{\ln(x)}\sqrt{2\pi})t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(\ln(t)-\mu_{\ln(x)})^2}{\sigma_{\ln(x)}^2}\right)} \quad (24)$$

Donde la media está expresada por la ecuación (25):

$$\mu_{\ln(x)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x)_i \quad (25)$$

Con los datos de tiempo de reparación

$$\mu_{\ln(x)} = 6.1945$$

Donde las variables N y x_i corresponden al número total de datos y horas de reparación reportadas respectivamente.

La ecuación (26) permite el cálculo de la desviación estándar muestral

$$\sigma_{\ln(x)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(x_i) - \mu_{\ln(x)})^2} \quad (26)$$

Con los datos de reparación se obtiene:

$$\sigma_{\ln(x)} = 1.4626$$

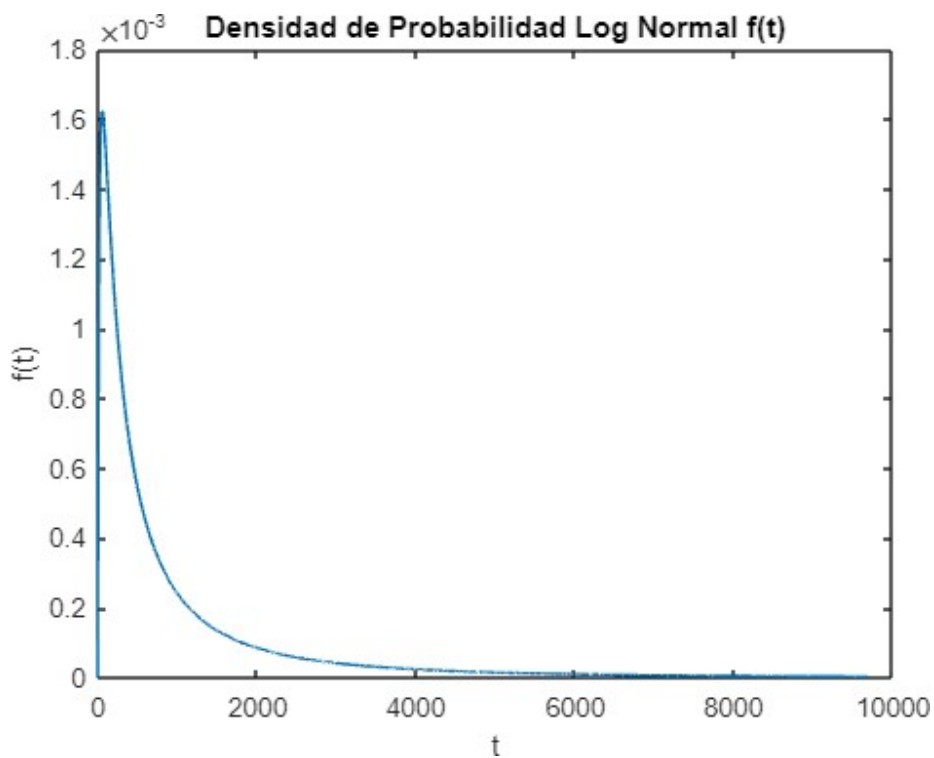
4.2.3.1 Función de densidad de probabilidad de Log normal (PDF) $f(t)$.

La ecuación (27) permite el cálculo de la densidad de probabilidad $f(t)$, reemplazando los valores de $\mu_{\ln(x)} = 6.1945$ y $\sigma_{\ln(x)} = 1.4626$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo:

$$f(t) = \frac{1}{1.4626\sqrt{2\pi}t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(\ln(t)-6.1945)^2}{1.4626^2}\right)} \quad (27)$$

Figura 18

Función $f(t)$ de la distribución Log Normal



4.2.3.2 Función de probabilidad de falla (Desconfiabilidad) Log normal F(t).

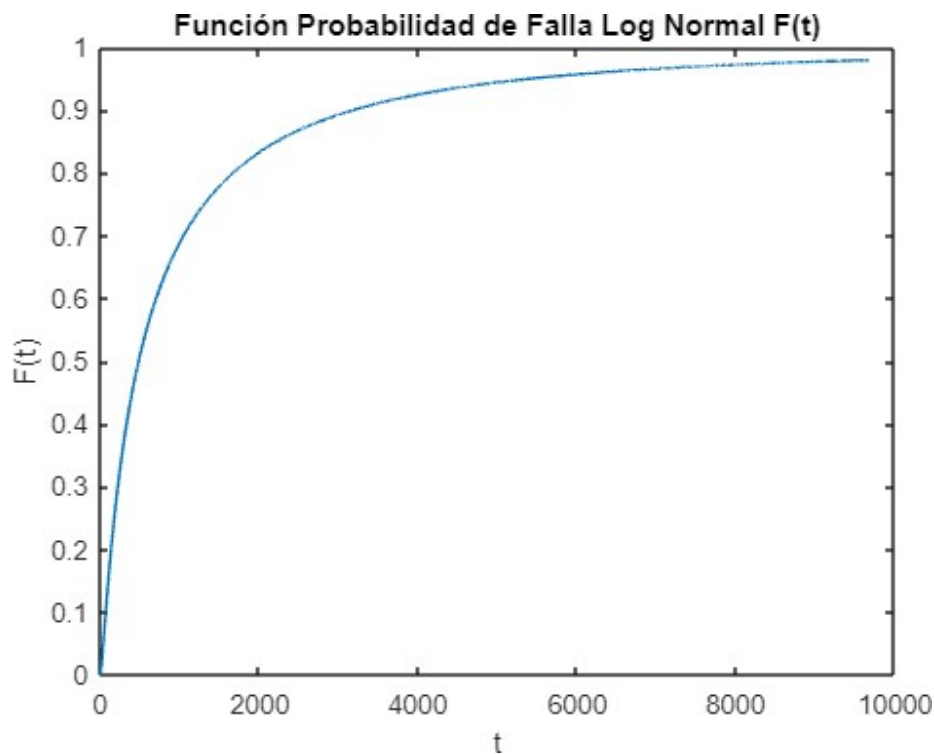
La ecuación (28) permite el cálculo de la Desconfiabilidad Log normal F(t) para la distribución Log normal reemplazando los valores de $\mu_{\ln(x)} = 6.1945$ y $\sigma_{\ln(x)} = 1.4626$, y graficando la ecuación con respecto al tiempo:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma_{\ln(x)}\sqrt{2\pi}t} \int_{\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma_{\ln(x)}}\right)^2} \quad (28)$$

La grafica con respecto al tiempo t

Figura 19

Función F(t) para la distribución Log Normal



4.2.3.3 Función de confiabilidad Log normal R(t)

La ecuación (29) permite el cálculo de la confiabilidad Log normal R(t) para la distribución Log normal con los valores de $\mu_{\ln(x)} = 6.1945$ y $\sigma_{\ln(x)} = 1.4626$, es:

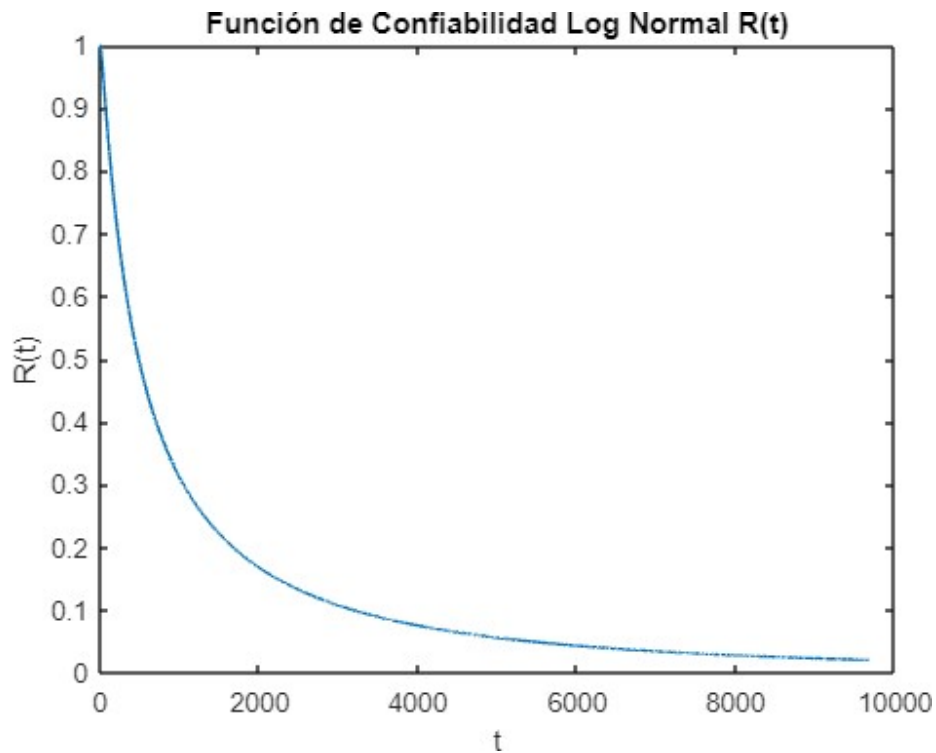
$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$R_{(t)} = 1 - \frac{1}{\sigma_{\ln(x)}\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (29)$$

La grafica con respecto al tiempo t

Figura 20

Función R(t) para la distribución Log Normal



4.2.3.4 Función Hazard o tasa de riesgo Log normal $h(t)$

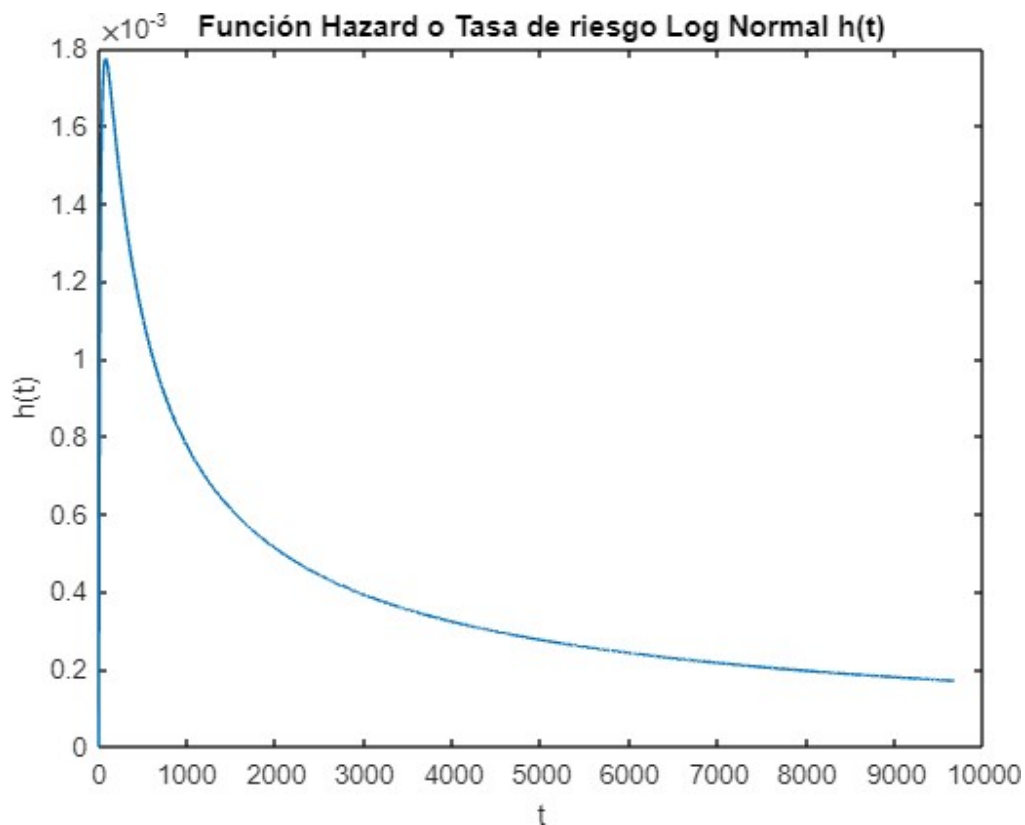
La ecuación (30) permite el cálculo de la tasa de riesgo $h(t)$ para la distribución Log normal, reemplazando los valores de $\mu_{\ln(x)} = 6.1945$ y $\sigma_{\ln(x)} = 1.4626$, y graficando la ecuación:

$$h_{(t)} = \frac{f_{(t)}}{R_{(t)}} \quad (30)$$

La grafica con respecto al tiempo t

Figura 21

Función $h(t)$ para la distribución Normal



4.2.3.5 MTTR tiempo medio entre reparaciones

La ecuación (31) permite el cálculo del tiempo medio entre reparaciones para una distribución

Log normal, reemplazando los valores $\mu_{\ln(x)} = 6.1945$ y $\sigma_{\ln(x)} = 1.4626$, y graficando la función:

$$MTTR = e^{\left(\mu_{\ln(x)} + \frac{\sigma_{\ln(x)}^2}{2}\right)} \quad (31)$$

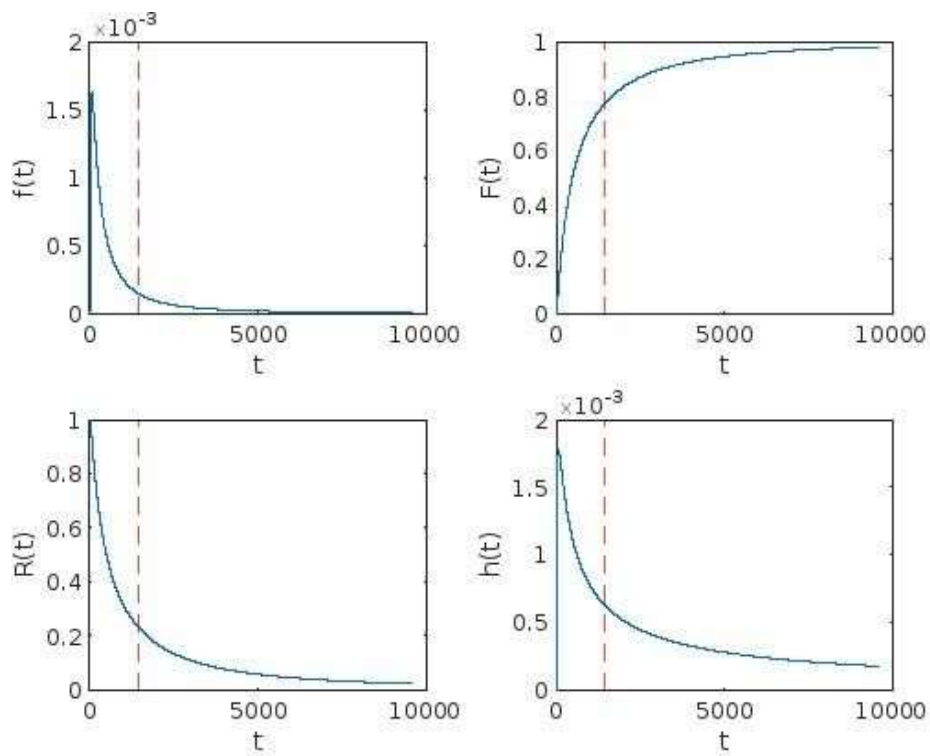
$$MTTR = e^{\left(6.1945 + \frac{1.4626^2}{2}\right)}$$

$$MTTR = 1428.1 \text{ horas}$$

MTTR para cada una de las funciones

Figura 22

Representación de MTTR para cada función de densidad



4.3 Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de ajuste serán empleadas para determinar cuál de las tres distribuciones aplicadas representan de mejor manera los datos estudiados, se aplican dos pruebas de bondad de ajuste; Pruebas de Chi-cuadrado y prueba de Kolmogorov-Smirnov

4.3.1 Prueba Chi-cuadrado

La prueba de Chi-cuadrado, calculada mediante (32), busca determinar el valor de la suma del cuadrado de las sumas de los valores observados, en este caso los rangos medios (BM), y los valores teóricos calculados en las tres distribuciones de confiabilidad. Los valores que se ajusten a un valor de significancia de 0.05 se tomarán como valores de aceptación. (Rativa & Espinosa, 2021). Se denominan hipótesis nulas cuando los valores de las distribuciones Normal, Weibull 2P y Log normal se comportan como los valores observados y la hipótesis alternativa cuando los valores de las tres distribuciones no se comportan como los valores observados, siendo la primera hipótesis la aceptada (Rativa & Espinosa, 2021).

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\text{Observado}_i - \text{Teorico}_i)^2}{\text{Teorico}_i} \quad (32)$$

$$X^2_{Normal} = X^2_{0.05, (144-1)} = 8.1798$$

$$X^2_{Weibull\ 2P} = X^2_{0.05, (144-1-1)} = 5.4919$$

$$X^2_{Log\ normal} = X^2_{0.05, (144-1-1)} = 0.4231$$

Teniendo en cuenta los valores de Chi Cuadrado en la Tabla 6, se observa que, para el total de valores de muestra analizados, 144, y para el valor de significancia 0.05 previamente determinado,

se debe observar los valores de la tabla entre 140 y 160.

Tabla 6

Valores estipulados de Chi Cuadrado

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	62,5811	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	76,2226	72,1660	69,9569	65,4101	61,6562
50	86,6603	82,6637	79,4898	76,1538	71,4202	67,5048
55	93,1671	89,0344	85,7491	82,2920	77,3804	73,3115
60	99,6078	95,3443	91,9518	88,3794	83,2977	79,0820
70	112,3167	107,8079	104,2148	100,4251	95,0231	90,5313
80	124,8389	120,1018	116,3209	112,3288	106,6285	101,8795
90	137,2082	132,2554	128,2987	124,1162	118,1359	113,1452
100	149,4488	144,2925	140,1697	135,8069	129,5613	124,3421
120	173,6184	168,0814	163,6485	158,9500	152,2113	146,5673
140	197,4498	191,5653	186,8465	181,8405	174,6478	168,6130
160	221,0197	214,8081	209,8238	204,5300	196,9152	190,5164

Los valores calculados al ser menores que los valores descritos en las tablas, son aceptados, lo que implica que las tres distribuciones se ajustan al comportamiento de los datos estudiados, pero la distribución Log normal al tener el menor valor, es la distribución que más se aproxima a las horas de reparación analizadas.

4.3.2 Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de ajuste de Kolmogorov-Smirnov es usada para decidir si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica (mora, 2009).

Se determina con la ecuación (33):

$$K - S = \text{Max}|F_{(t_1)} - S_n(t_1)|, |F_{(t_1)} - S_n(t_{i-1})| \quad (33)$$

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 o los valores del rango medio (BM). Corresponderá a la distribución los valores que se ajusten a un nivel de significancia del 5%.

Los valores obtenidos son:

$$K - S_{144,0.05,Max Normal} = 0.2510$$

$$K - S_{144,0.05,Max Weibull 2P} = 0.1621$$

$$K - S_{144,0.05,Max Log normal} = 0.0646$$

Tabla 7*Valores estipulados de K-S*

n	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
n > 50	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$

Siendo $n > 50$, para un nivel de significancia de 5% tenemos que

$$K - S = \frac{1.36}{\sqrt{144}} = 0.1133$$

Podemos observar que las distribución normal y Weibull 2P no se ajustan dado que son valores mayores a 0.1133, por lo tanto, la distribución Log normal es la que mejor se ajusta a los datos estudiados.

De los resultados de las dos pruebas de ajuste aplicadas, se puede concluir que la distribución Log normal es la que mejor describe el comportamiento de los datos, en la figura 22 y figura 23 se comprueba que la función PDF de la distribución Log normal es la más cercana a los datos reales

y adquiere la misma forma cóncava a la curva etapa 1 de mortalidad infantil. En términos de mantenimiento, esto implica que el plan de mantenimiento de Termoguajira presenta falencias debido a la operación incorrecta, delegación de actividades de mantenimiento a personal sin el conocimiento operacional o sin la preparación idónea para realizarlas siguiendo las directrices del fabricante.

Figura 23

Función PDF de las 3 pruebas realizadas Vs curva de los datos reales

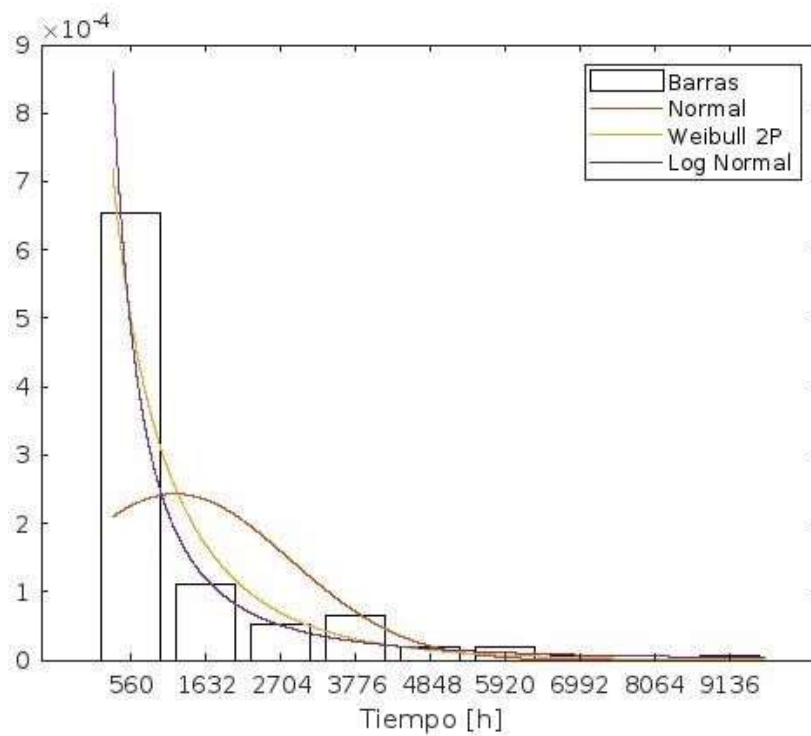
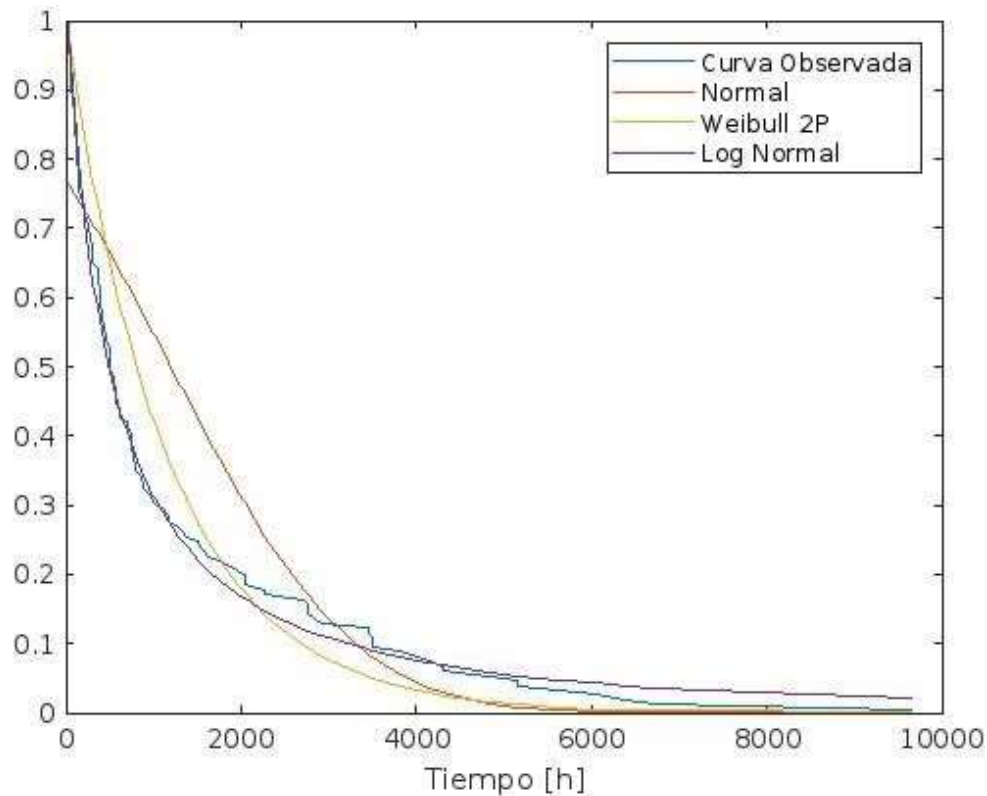


Figura 24

Función de confiabilidad $R(t)$ Vs la curva de los datos reales



5. PMO

La optimización del mantenimiento planeado tiene como fin mejorar los procesos y estrategias de mantenimiento, mejorando la confiabilidad, mantenibilidad y la disponibilidad de los activos, reduciendo las horas de trabajo para atender las necesidades de toda la planta (Ponce, A. 2018).

Entre las técnicas de mantenimiento las que presentan mayores resultados en la mejora de la optimización industrial, son el Mantenimiento productivo total ó TPM, el cual mediante la participación integral de los trabajadores mejora la productividad industrial y el Mantenimiento centrado en confiabilidad ó RCM que basado en la confiabilidad operacional de los equipos

persigue optimizar la ejecución del mantenimiento preventivo. El PMO surge como apoyo a estas dos metodologías aplicando nuevas técnicas estadísticas (García, O. 2007).

El proceso PMO debe basarse en la criticidad de los sistemas de la planta (Turner, S), obtenida de la jerarquización de los sistemas en función de su impacto (Ponce, 2018). Cabe anotar que en este trabajo en particular no es necesario realizar este análisis, debido a que Termoguajira ya cuenta con una matriz de criticidad establecida y consolidada, catalogándose los PES con un impacto operacional bajo, pero un impacto en la seguridad moderado afectando el medio ambiente.

La implementación del PMO adaptados de la recomendación de Steve Turner consta de nueve pasos:

5.1 Paso 1: Recopilación de tareas

En el proceso PMO La experiencia y conocimiento del talento humano de la empresa es un pilar importante para la aplicación de este, comienza analizando el programa de mantenimiento existente en la empresa, trabajando con el personal de la planta, identificando cuales de las actividades que se implementan actualmente en la empresa son útiles y cuáles no.

5.2 Paso 2: Análisis de Modos de Falla (FMEA)

La buena recolección de datos del historial de fallas es crucial para la buena implementación del análisis de modo de falla en el nivel de función de cada ítem mantenible, listando cada falla funcional, los modos de falla, efectos y las consecuencias. Al ser una metodología implementada en industrias en funcionamiento el FMEA no requiere un nivel de detalle extenso enfocándose solamente en las fallas de mayor relevancia o probabilidad de ocurrencia. Se enfoca en la

recolección de las tareas de mantenimiento formal e informal recopiladas y ordenadas en el paso anterior, se identifica que modos de falla enfocada en esas tareas de mantenimiento.

5.3 Paso 3: Racionalización y Revisión del FMA

En este paso se revisa el FMEA y junto al equipo de trabajo se identifica la duplicación de tareas, también se añaden aquellos modos de fallas adicionales que se consideren relevantes o con la probabilidad de ocurrencia en base a la experiencia del personal encargado de operar y mantener los PES.

5.4 Paso 4: Análisis funcional

La definición de pérdida funcional con cada falla se realiza en este paso. Aunque es opcional, debido a la complejidad de los PES se requiere el entendimiento detallado de todas las funciones del activo, para el aseguramiento de un programa de mantenimiento sólido (Turner, S, OMCS).

5.5 Paso 5: Evaluación de consecuencias

Aquí cada modo de falla es analizado para determinar si las fallas son evidentes u ocultas, para aquellas que sean evidentes se debe realizar un análisis de riesgos y consecuencias operacionales (Turner, S, OMCS).

5.6 Paso 6: Determinación de las políticas de mantenimiento

Los programas de mantenimiento exitosos se enfocan más en las consecuencias de las fallas que en los activos en sí, bajo esta premisa moderna, en este paso, cada modo de falla es analizado bajo los principios del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), se establecen nuevas políticas

de mantenimiento haciendo evidente lo siguiente (Turner, S, OMCS):

- Las actividades del programa de mantenimiento actual generan valor agregado y cuáles no, eliminando estos últimos,
- Cuales tareas serían más efectivas y menos costosas si se realizaran bajo condición y no llevarlas a la falla y viceversa,
- Que tareas serían más efectivas si se realizan bajo diferentes rutinas,
- Que fallas se manejarían mejor por medio del uso de tecnología avanzada o simple,
- Qué tipo de información se debe recolectar para predecir mejor el comportamiento del equipo, durante su ciclo de vida y,
- Que fallas se deben eliminar con la ayuda de un Análisis causa raíz (RCA)

5.7 Paso 7: Agrupación y revisión

Al finalizar el análisis de las tareas, el equipo de trabajo establece el método más eficiente y efectivo para la administración del mantenimiento de los activos teniendo en cuenta los limitantes en cuanto a producción y otros. En este paso es posible que haya transferencia de responsabilidades en la ejecución de tareas de mantenimiento preventivo entre los especialistas de mantenimiento y los operadores para lograr eficiencia y ganancias en producción (Turner, S, OMCS).

5.8 Paso 8: Aprobación e implementación

En este paso, el resultado del análisis se presenta a la alta dirección para su revisión y comentarios. El autor Steve Turner recomienda realizar la presentación usando el reporte automático generado por el software de PMO2000, dicho software muestra de forma detallada los cambios a

implementar y su justificación. La etapa de implementación es la que requiere mayor dedicación de tiempo y donde es propenso que se presenten más dificultades. Es importante estar atento a los detalles para hacer la implementación un éxito (Turner, S, OMCS).

5.9 Paso 9: Programa de vida y mejoramiento continuo

En este paso se consolida el mantenimiento preventivo reemplazando el mantenimiento reactivo por uno planeado. La intención es afianzar el mejoramiento continuo, enfocando los recursos en corregir defectos de diseño o limitaciones relacionadas a la operación.

La intención final es crear una organización que busque constantemente el mejoramiento continuo, generar motivación por parte de dirección, sentido de pertenencia en los trabajadores y compromiso en el mejoramiento de su trabajo dando la importancia a evaluar las garantías del desarrollo correcto de las tareas enfocadas en atacar las fallas no planeadas que se presenten.

6. Implementación del PMO

Para la implementación del PMO se formó un equipo multidisciplinario conformados por técnicos electricistas, ingenieros mecánicos y electricistas de la planta, en específico de las siguientes áreas:

- Gerencia,
- Área de Servicios Técnicos,
- Planeación de mantenimientos eléctricos y mecánicos,
- Taller eléctrico y,
- Taller mecánico.

6.1 Paso 1: Recopilación de tareas

En este primer paso se reúne información del programa de mantenimiento existente, para ello es necesario contar con fuentes de información establecidas donde se encuentre la información requerida para el análisis.

Como fuente primaria se establece el software de mantenimiento CMMS implementado en Termoguajira llamado Mainsaver, que cuenta con toda la información y datos propios de la mantención de los precipitadores. Este software contiene todas las ordenes de trabajo realizadas para la mantención de todos los activos de la central, cada uno cuenta con un serial para identificarlos denominado KKS, las ordenes de trabajo con fechas de apertura y fechas de cierre, personal encargado de la OT, repuestos utilizados y el costo de los mismos.

Como fuente secundaria se establecen los manuales de operación y mantenimiento suministrados por el fabricante a la empresa, las entrevistas con el personal de operación y mantenimiento que cuenta con la experiencia en mantenimiento de este activo en particular.

El área de planeación programa las actividades de mantenimiento en base a ordenes de trabajo, la información que se destaca en Mainsaver es:

Ordenes de trabajo (OT): Creada por el área de planeación de mantenimiento y se programa al área de taller eléctrico, taller mecánico, taller de control e instrumentación y servicios técnicos, describe el trabajo requerido y el equipo a intervenir.

Los operadores de cada área reportan que algún equipo en la planta requiere la intervención y es cuando se crean estas órdenes.

Numero de KKS: Corresponde a la taxonomía de los activos de la central Termoguajira, siguiendo la metodología ISO-14224.

Tipo de trabajo: Clasificados en mantenimiento preventivo, correctivo o mejorativos, se definen de acuerdo a la clase de actividad que se requiere realizar.

Estatus: Indicación del estado de la orden de trabajo programado.

Fecha de origen: Fecha de creación de la orden de trabajo

Fecha de terminación: Fecha de cierre de la orden de trabajo, se entiende que el trabajo fue culminado.

Al revisar las actividades de mantenimiento preventivo registradas en mainsaver se encuentra con las siguientes actividades:

1. Inspección visual de aisladores
2. Inspección de distanciamiento entre placas y electrodos
3. Inspección de resistencia de calefacción de aisladores
4. Limpieza y ajuste

En la Tabla 8 se puede apreciar la recopilación de información de las actividades de mantenimiento realizadas actualmente a los PES, información extraída de Mainsaver y suministrada por el personal operativo. Se puede observar que las acciones de mantenimiento son generales y la gran parte de subsistemas de estos equipos no son registrados formalmente.

Tabla 8*Descripción de las actividades de mantenimiento realizadas a precipitadores*

Parte	Acción	Actividad	Intervalo
Estructura contenedora	Verificar visualmente los conductos de entrada y de salida en busca de corrosión y posible exceso de polvo.	Revisar	Parada de planta
Aisladores	verificar visualmente si el aislador presenta grietas y que los elementos térmicos estén en buen estado. Verificar visualmente que el eje aislador del sistema de golpeadores no esté dañado.	Revisar	Parada de planta
Parrilla distribuidora de gas	Remover exceso de polvo en parrilla de entrada de gas y distribución de precipitador. Si se encuentra polvo anormal en las parrillas, identificar perforaciones erosionadas en la parrilla de distribución de entrada (85mm de diámetro) y notificar la anomalía para ser examinada.	Limpiar Revisar	Parada de planta
Electrodo de descarga	Verificar la distancia entre las placas. Tolerancia \pm 10 mm. (método pasa pasa)	Registrar	Parada de planta

	Verificar visualmente si se encuentra electrodos sueltos, remover y reemplazarlos.	Reemplazar	
Martillos	Verificar visualmente la caída de los martillos y que estos no se queden pegados.	Revisar	Parada de planta
Golpeadores	Verificar visualmente si la caída de los martillos es producto del desgaste de las grapas que sujetan al eje móvil		
	Verificar limpieza y ajuste en todas las conexiones del panel.		
Celda de control	Verificar en la RTU que lleguen todas las señales al EPIC y medición de aislamiento	Revisar	Parada de planta
	Verificar que los ventiladores entren en servicio		
	Verificar que las conexiones de los detectores de posición de los Breakers estén operativas		

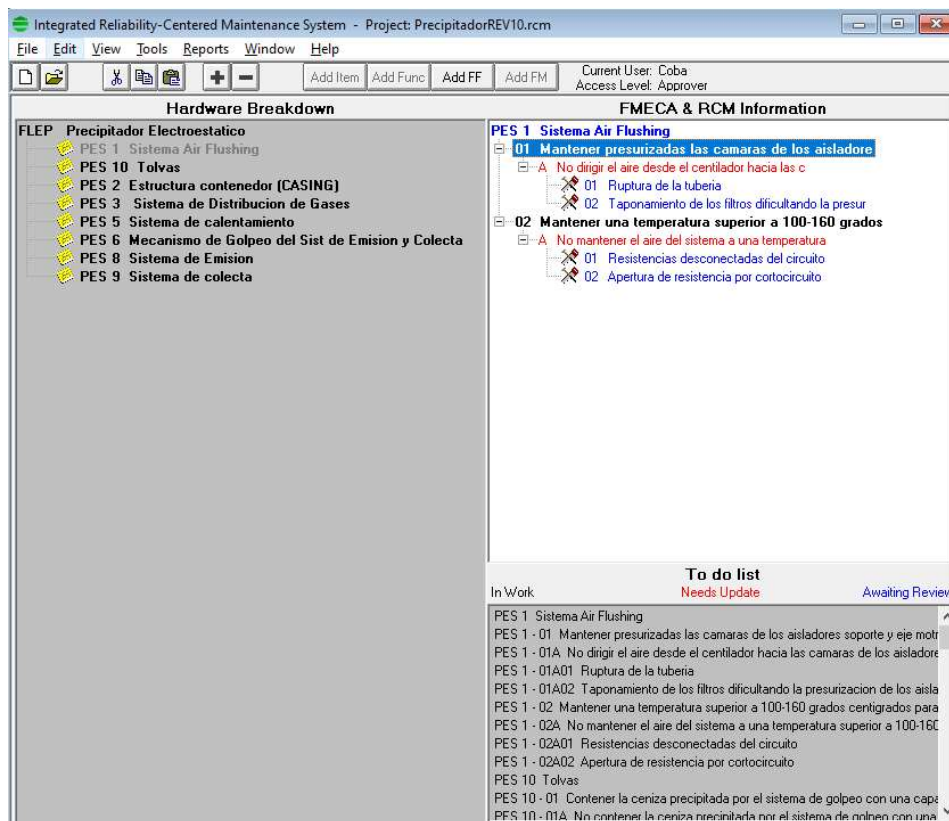
6.2 Paso 2: FMEA

Para realizar la matriz de análisis de modos de falla (FMEA), es utilizado el software IRCM. Las partes del precipitador se agrupan en sistemas de tal manera que se unen las distintas partes que en

conjunto realizan una función específica.

Figura 25

Interfaz de software IRCM



Entre los datos de entrada al software es posible estacar:

- **Ítems mantenibles y su respectiva función:** Sistemas que conforman los PES y que realizan en su contexto operacional.
- **Falla funcional:** Cuando el activo no es capaz de realizar una función en los parámetros que el usuario lo requiere.
- **Modos de falla:** Cualquier evento que causa una falla funcional.

- **Efecto de la falla:** Se refiere a las condiciones del ítem mantenible ante la presencia de la falla.
- **Efecto local:** Que ocasiona la falla del activo en sitio o de manera localizada en la parte que falla.
- **Método de detección:** Se refiere a la manera en que el personal que interviene el activo detecta la presencia de la falla.
- **MTBF (Tiempo medio entre fallas):** se refiere a cuánto tiempo en promedio está ocurriendo una falla, se calcula el tiempo operativo del activo y la cantidad de falla. MTBFes la razón entre el tiempo operativo y cantidad de fallas.
- **Condición de falla potencial:** Condición definible y detectable que indique que una falla funcional esté próxima a ocurrir. (instrucciones IRCM)
- **Condición de falla funcional:** Incapacidad de un elemento para realizar una función específica dentro de los límites especificados. (instrucciones IRCM)
- **Descripción de la tarea de mantenimiento:** Inspección programada diseñada para detectar una posible condición de falla. (Instrucciones IRCM)
- **Personal responsable de la tarea de mantenimiento:** Personal encargado de realizar las tareas de mantenimiento.
- **Consecuencia de la falla:** Determina si la falla es oculta o evidente.

Con este software es posible realizar los pasos 2, 3, 4 y 5 simultáneamente, con el equipo multidisciplinar se estudian con detenimiento las tareas de mantenimiento, se extraen de manera independiente aquellas que se encuentran unidas entre sí y que se encuentran descritas de forma ambigua, se eliminan las que se considere no generan valor agregado y se añaden las actividades que ataquen de manera precisa los modos de falla de cada sistema del PES.

Los resultados de la matriz del FMEA son muestran en las siguientes tablas a continuación:

Tabla 9

Análisis de modos de falla de la Estructura contenedora o Casing

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MTTO	CONSECUENCIA
Estructura contenedora (CASING)	A. Contener los componentes involucrados en el proceso de separación de material particulado del gas contaminado de la caldera de fuerza y aportar soporte estructural manteniendo un espesor de placa de 4,75mm	A. No contener los componentes involucrados en el proceso de separación de material particulado del gas contaminado de la caldera de fuerza y aportar soporte estructural manteniendo un espesor de placa de 4,75mm	1. Pérdida de espesor de las láminas de acero del casing por corrosión	1. Inspección visual en busca de deterioro evidente en las láminas del recubrimiento, medida de espesor de láminas (4,75mm)	1. Evidente
	B. Garantizar hermeticidad de los componentes internos del contacto con agentes climáticos manteniendo un espesor de placa de 4,75mm	B.No permitir que los equipos y sistemas involucrados en el proceso de colecta de ceniza no entren en contacto con el ambiente.	1. Agujeros en el techo caliente del precipitador	1. Inspección visual del interior del casing para verificar estado de las láminas de acero del techo caliente,	1. Evidente
			2. Empaques/Aislamiento de las puertas de los manholes en mal estado	2. Inspección visual semanal del estado de las puertas e identificar puntos de entrada de aire, identificar lubricación de bisagras, estado del aislamiento térmico, Verificar estado de los empaques y reemplazar inmediatamente si se identifica anomalías	1. Evidente
			3. Junta de la pared de la carcasa en mal estado	3. Inspección visual interna para verificar estado de las juntas del casing, aplicar punto de soldadura para reponerlas	1. Evidente
	C. Evitar pérdida de temperatura interna del PES (100 - 160 grados centígrados) para mantener la ceniza volátil	C. No evitar pérdida de temperatura interna del PES (100 - 160 grados centígrados) para mantener la ceniza volátil	1. Pérdida de aislamiento térmico del recubrimiento del PES	1. Inspección visual periódica para identificar posible anomalía en el aislamiento, Realizar periódicamente prueba de termografía por toda la superficie del casing.	1. Evidente

Tabla 10*Análisis de modos de falla del Sistema de distribución de gases*

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MTTO	CONSECUENCIA
Sistema de distribución de gases	A. Distribuir la entrada del gas a una velocidad constante a través de toda la sección transversal del precipitador con un flujo del gas en operación de 614000 Nm ³ /h	A. No distribuir la entrada del gas a una velocidad constante a través de toda la sección transversal del precipitador con un flujo del gas en operación de 614000 Nm ³ /h	1.Deterioro y ruptura de las parrillas de distribución de entrada y salida	1.Inspeccion periódica en mantenimiento en busca de indicios de degradación de las láminas, Reemplazo de láminas de las parrillas	1. Evidente
			2.Orificios de las parrillas distribuidoras de gases de entrada con mayor diámetro debido a la erosión de ceniza sobre las mismas ocasionando deformación de las perforaciones	2.Inspeccion visual en parada en busca de estado inusual de orificios, cambio de parrillas cuando haya presencia de grietas, Identificar erosión sobre las placas que causen deformación de las perforaciones de las parrillas	2.Evidente
			3.Desprendimiento de las parrillas de distribución de entrada y salida	3.Inspeccion visual en busca de parrillas desprendidas, reforzar sujeción de las parrillas en el embudo de entrada	3.Oculto
			4.Deformacion de las láminas de las parrillas	4.Inspeccion periódica para verificar estado de las láminas, prueba de pasa cubos	4.Evidente
	B. Distribuir a la salida los gases internos del precipitador en dirección de la chimenea con un flujo del gas en operación de 614000 Nm ³ /h a una velocidad constante	B. No distribuir a la salida los gases internos del precipitador en dirección de la chimenea con un flujo del gas en operación de 614000 Nm ³ /h a una velocidad constante	1.Deformacion de las láminas de las parrillas	1.Inspeccion periódica para verificar estado de las láminas, realizar prueba de pasa cubos	1.Evidente
			2.Desprendimiento de las láminas de distribución de la salida	2.Inspeccion visual en parada identificar placas desprendidas	2.Oculto
	C. Direccionar el flujo del gas (614000 Nm ³ /h) a los campos con una velocidad constante de 1,11 m/s	C .No direccionar el flujo del gas (614000 Nm ³ /h) a los campos con una velocidad constante de 1,11 m/s	1.Agujeros en láminas de las placas deflectoras	1.Inspeccion visual en parada para detectar orificios en placas colectoras, deterioro del material.	1. Evidente
			2.Desprendimiento de las placas deflectoras	2.Inspeccion visual en parada identificar placas desprendidas	2.Oculto

			3.Deformacion de las láminas de las parrillas	3.Inspeccion periódica para verificar estado de las láminas, prueba de pasa cubos	3.Evidente
--	--	--	---	---	------------

Tabla 11

Análisis de modos de falla del sistema de calentamiento

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MTTO	CONSECUENCIA
Sistema de calentamiento	A. Calentar los aisladores con una temperatura superior a 100-160 grados centígrados para evitar su ruptura por choque térmico	A. No calentar los aisladores con una temperatura superior a 100-160 grados centígrados para evitar su ruptura por choque térmico	1.Ruptura de resistencias	1.Medición periódica de la acometida, Verificar estado general de la resistencia, observar oxidaciones y corrosión, medida de la corriente de escape, resistencia óhmica.	1. Evidente
			2.Cortocircuito en acometida de las resistencias	2.Limpieza de rack de resistencias periódica, reajuste de los terminales de conexiones y medida de la continuidad de la acometida.	1. Evidente
		B. Calentar los aisladores a una temperatura inferior a 100-160 grados para evitar ruptura de choque térmico	1.Bajo aislamiento de la acometida de las resistencias	1.Medida de aislamiento de la acometida (1Giga Ohm), Verificar estado del encauchetado del conductor de la acometida, verificar que los terminales de la acometida se encuentran bien ajustados	1. Evidente

Tabla 12*Análisis de modos de falla del sistema de golpeo del sistema de emisión y colecta*

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MTO	CONSECUENCIA
Sistema de golpeo del sistema de emisión y colecta	A. Precipitar el 99.2%(para U1) y 98.8%(para U2) del material particulado provenientes de la combustión de carbón captado por los sistemas de emisión y colecta mediante el golpe sobre yunques instalados en los marcos porta electrodos cada minuto por ciclo con martillos acoplados a un eje giratorio movido por ruedas dentadas unidas a un motor reductor.	A. No precipitar el 99.2%(para U1) y 98.8%(para U2) del material particulado provenientes de la combustión de carbón captado por los sistemas de emisión y colecta mediante el golpe.	1.Ruptura del eje aislador	1.Inspeccion visual periódica en búsqueda de fisuras en el cuerpo del aislador, Toma de medida de corriente del motor.	1.Evidente
			2.Unidad de control EPIC III no envía señal de puesta en servicio al sistema de golpeo.	2.Verificar el ajuste de conexión del circuito de control de la Unidad Epic,	1.Evidente
		B. Precipitar menos del 99.2%(para U1) y 98.8%(para U2) del material particulado provenientes de la combustión de carbón captado por los sistemas de emisión y colecta mediante el golpe sobre yunques instalados en los marcos porta electrodos cada minuto..	1.Holguras en las grapas de los martillos	1.Inspeccion de grapa en parada para identificar posibles holguras, realizar calentamiento de grapas para lograr conservarlas cerradas.	1.Evidente
			2.Desprendimiento de martillos por apertura de grapas.	2.Inspeccion visual en busca de grapas abierta y aplicar calor para cerrarlas	1.Evidente
			3.Desalineacion del conjunto de martillos con respecto a los marcos portaelectrodos por deformación del cuerpo de las chumaceras.	3.Inspeccion en búsqueda de deformaciones de los yunques en las esquinas y registro de los que se encuentren en mal estado para reemplazo en mantenimiento mayor, identificar holguras en el cuerpo de chumaceras o presencia de desgaste en el material, realizar croquis de las posiciones que presenten anomalías	1.Evidente
			4.Atascamiento del sistema motriz.	4.Medicion de holguras en los acoples del sistema motriz con respecto al eje del aislador	1.Evidente
			5.Holguras de los yunques por tornillería floja	5.Perdida del yunque ocasionando golpe de los martillos en marcos (en U2) o no permite la transmisión de la onda de choque sobre los marcos (en U1)	1.Evidente
			6.Desgaste de los pines de las ruedas dentadas.	6.Inspeccion visual periódica que verifique el estado de las ruedas dentadas	1.Evidente

			7.Grietas en el eje aislador causadas por un inadecuado calentamiento previo a energizar el campo, manejo inadecuado durante su instalación	7.Inspeccion visual del aislador y prueba de aislamiento del campo con respecto al casing	1.Evidente
--	--	--	---	---	------------

Tabla 13*Análisis de modos de falla del sistema de emisión*

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MTO	CONSECUENCIA
Sistema de emisión	A.Ionizar electricamente 6447 kg/h (para U1) y 4950 kg/h (para U2) de partículas de ceniza en el flujo de gas contaminado proveniente de la caldera de fuerza permitiendo la circulación de corriente de 0-1400 Ma.	A.No ionizar electricamente 6447 kg/h (para U1) y 4950 kg/h (para U2) de partículas de ceniza en el flujo de gas contaminado proveniente de la caldera de fuerza permitiendo la circulación de corriente de 0-1400 mA (mili Ampere).	1.Grietas en el aislador soportes y pasatapas causadas por un inadecuado calentamiento previo a energizar el campo, manejo inadecuado durante su instalación.	1.Limpieza e inspección visual del estado general del aislador, observar grietas, fisuras	1. Evidente
			2.Ruptura o fisura del conductor de conexión de alta tensión (secundario) del rectificador con el aislador pasatapas.	2.Medir aislamiento y continuidad del conductor, verificar conexión del conductor por la apertura de la puerta en el tubo de protección entre el rectificador y el compartimiento del aislador	1. Evidente
			3.Acumulacion de polvo de ceniza en cuerpo de aisladores soporte y pasatapas.	3.Inspeccion visual del cuerpo aislador soporte y pasatapas en busqueda de acumulacion de ceniza.	1. Evidente
			4.Desajuste y desalineacion del marco porta electrodo con respecto a la placas colectoras.	4.Inspeccion visual en busca de desalineamiento del marco, estado de la guia del marco, prueba de pasa cubos para identificar distancia entre placas colectoras y marco	1. Evidente

			5.Ruptura de la ceramica de los aisladores soporte y pasatapas.	5.Inspeccion visual del aislador, medicion de continuidad del conductor de alimentacion del campo	1. Evidente
		B.Ionizar electricamente menos de 6447 kg/h (para U1) y 4950 kg/h (para U2) de particulas de ceniza en el flujo de gas contaminado proveniente de la caldera de fuerza permitiendo la circulacion de corriente de 0-1400 mA	1.Desprendimiento de los electrodos del marco portaelectrodo .	1.Inspeccion visual para determinar electridos caidos, desgaste de la sujecion de los electrodos o desprendimiento del marco portaelectrido en uno de sus extremos	1. Evidente
			2.Acumulacion excesiva de material seco o endurecido sobre los electrodos por la deficiencia del sistema de golpeo	2.Inspeccion visual en los mantenimientos preventivos de la cantidad de ceniza sobre electrodos de emision, verificar que el sistema de golpeo este funcionando correctamente e identificar las causas	1. Evidente

Tabla 14*Análisis de modos de falla del sistema de colecta*

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MTTO	CONSECUENCIA
			1.Perdida de espesor de la placa colectora	1.Inspeccion visual y medición de espesores de lasláminas de las placas colectoras	1.Evidente
	A. Colectar 6447	A. Colectar	2.Acumulacion de material endurecido en las placas colectoras.	2.Inspeccion visual en sitio enbusca de capas de ceniza sobre las placas	1.Evidente

Sistema de colecta	kg/h (para U1) y 4950 kg/h (para U2) de ceniza contenida en los gases de escape de la caldera por un tiempo determinado hasta que actúe el sistema de golpeo y las precipite, manteniendo un espesor de placa de 1.5 mm	menos de 6447 kg/h (para U1) y 4950 kg/h (para U2) de ceniza contenida en los gases de escape de la caldera por un tiempo determinado hasta que actúe el sistema de golpeo y las precipite, manteniendo un espesor de placa de 1.5 mm.	3. Placas colectoras deformadas.	3. Inspección visual periódica en busca de deformación en placas colectoras, Prueba de alineación para verificar cumplimiento de la tolerancia de separación entre placas y marco porta-electrodos	1. Evidente
			4. Desprendimiento de las placas colectoras por agarres oxidados y/o partidos	4. Inspección visual periódica para identificar el estado del agarre de las placas al perfil del marco	1. Evidente

Tabla 15*Análisis de modos de falla de las tolvas*

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MANTENIMIENTO	CONSECUENCIA
Tolvas	A. Contener la ceniza precipitada por el sistema de golpeo con una capacidad de 426,3 m ³ previo al barrido	A. No contener la ceniza precipitada por el sistema de golpeo con una capacidad de m ³ previo al barrido	1. Ruptura en paredes de la tolva.	1. Inspección visual en búsqueda de rotos, degradación del material de la cubierta del exterior y aislamiento térmicos en mal estado de las tolvas	1. Evidente
			2. Falla de equipo vibrador de tolva	2. Inspección visual y auditiva de la entrada en operación del equipo.	2. Evidente

Tabla 16*Análisis de modos de falla del sistema Air flushing*

SISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	TAREA DE MANTENIMIENTO	CONSECUENCIA
Sistema de Air Flushing	A. Mantener presurizadas las cámaras de los aisladores soporte y eje motriz de tal manera que la ceniza no entre en contacto con los aisladores	A. No dirigir el aire desde el ventilador hacia las cámaras de los aisladores soporte y eje aislador.	1. Ruptura de tubería por deterioro del material debido a oxidación producto del medio.	1. Inspección visual periódica en campo por parte del operador del área en busca de grietas, agujeros, pérdida de espesor por corrosión de las tuberías.	1. Oculto
			2. Taponamiento de los filtros dificultando la presurización de los aisladores.	2. Inspección visual en busca de contaminación excesiva en filtros y cambiar periódicamente según la recomendación del fabricante de acuerdo a la experiencia de uso del PES. Limpieza semanal de filtros.	2. Evidente
	B. Mantener una temperatura superior a 100-160 grados centígrados para evitar choque térmico en aisladores	B. No mantener el aire del sistema a una temperatura superior a 100-160 grados centígrados	1. Resistencias desconectadas del circuito.	1. Medir la corriente del circuito de resistencias para identificar la integridad de la acometida del banco de resistencias.	1. Evidente
			2. Apertura de resistencia por cortocircuito	2. Medición de continuidad del circuito y revisión visual de integridad de resistencias, verificar causas del cortocircuito y corregir	2. Evidente

6.3 Paso 6: Determinación de las actividades de mantenimiento

Teniendo en cuenta los modos de falla identificados y los resultados del capítulo 5, se determinan las actividades de mantenimiento de tal manera que permita reducir la ocurrencia de las fallas, logrando un registro y monitoreo de la condición del PES, implementando actividades predictivas y preventivas. Es importante aprovechar la información de la lectura de los parámetros eléctricos medidos, los datos que muestra el EPIC III, por lo que el pilar fundamental para lograrlo es brindando capacitaciones a operadores y personal de mantenimiento que tendrá contacto directo con el equipo en las intervenciones requeridas.

Cabe mencionar que en este paso se implementó el paso 7 y 8, cada actividad de mantenimiento

es agrupada por sistema, se asigna responsable de cada tarea de mantenimiento considerando que tenga las capacidades técnicas para realizarlas, se estipula frecuencias de ejecución, con el objetivo de monitorear las condiciones operativas de los PES, conservar la vida de los componentes y del activo en conjunto y prevenir fallas. Las actividades de mantenimiento que requieran una revisión del interior de los PES deben ser realizadas en los periodos de paradas largas, la cual es estipulada de cada seis meses, por lo tanto, solo se hará mención de las tareas de rutina que se pueden realizar sin parar el equipo, las demás, entiéndase que serán realizadas cada seis meses. Las actividades se listan a continuación:

6.3.1 Tarea de mantenimiento predictivas

Cabe mencionar que Termoguajira a este activo en particular, actualmente no le realiza mantenimiento predictivo, principalmente por los PES no cuentan o están fuera de servicio instrumentación o tecnología de **medida de temperatura, medida de flujo, medidor de partículas, medida de velocidad del gas, sensores de nivel de tolvas**. Debido a esto, limita la recopilación de datos para tener una visión del comportamiento del equipo y comprobar que una falla esta próxima a ocurrir. Sin embargo, la unidad de control EPIC III proporciona un listado de alarma, se recomienda capacitar a los operadores del área para que hagan revisión periódica de las mismas y realicen el respectivo reporte, aviso e intervención oportuna. (Alstom, 1995).

Teniendo en cuenta que una gran parte de las fallas son detectadas por la lectura e interpretación de los valores de A, mA y kV de los medidores durante la operación (Alstom, 1995), además de la información suministrada por EPIC III en la RTU. Por lo tanto, la revisión de estos parámetros y registros por parte del operador del área se debe incluir como actividad predictiva, sin embargo, no se recopilan datos suficientes para determinar un plan de mantenimiento predictivo

sólido que realice un monitoreo de condición de los precipitadores.

Como se mencionó con antelación, la implementación de tecnología es importante para obtener información adicional del comportamiento interno de los PES, como por ejemplo el volumen y velocidad del gas interno del PES, mediante el análisis de flujo del gas para determinar la distribución del flujo del gas (Ávila, J. 2020). Distribución del gas en desequilibrio, ocasiona turbulencias hallándose áreas con alto, bajo y cero flujos de gas, en los lugares con alto flujo, las distintas aceleraciones con la concentración de material particulado colisionan con las partes internas del equipo ocasionando erosión de las mismas, lo que implica degradación prematura. En las zonas con bajo y cero flujos de gas es más propensa la acumulación y solidificación del polvo de difícil remoción en las distintas partes, degradando los componentes y afectando el rendimiento del activo.

6.3.2 Tareas de mantenimiento preventivas

El mantenimiento de los precipitadores, debe ser realizado durante largos periodos de paradas, las necesidades de mantenimiento dependen de la carga y a la concentración de polvo del gas de la planta. Termoguajira tiene establecida inspección dos veces al año, para verificar todo lo relacionado con desgaste o corrosión y, si es posible ejecutar reparaciones pertinentes. Cabe aclarar que el límite establecido del PES para el estudio, NO INCLUYE en el análisis a los siguientes equipos: transformadores, motores, válvulas, ventiladores.

A continuación, después de los resultados obtenidos se determinan las actividades de mantenimiento recomendadas para cada sistema de los PES, el intervalo de ejecución y el personal delegado para llevar a cabo el mantenimiento, para lograr aumentar la disponibilidad del activo y prevenir las fallas.

6.3.2.1 Estructura contenedora (Casing).**Tabla 17***Actividades de mantenimiento propuestas para el Casing*

Actividad	Intervalo	Delegado
Buscar presencia de corrosión, acumulación de polvo, rotos que permitan ingreso de humedad en los embudos entrada y salida, láminas externas que cubren el aislamiento térmico.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar deformación del aislamiento térmico, manta de lana mineral doble no superior a 75 y 50mm de espesor. Revisar causa de la deformación.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar deformación del aislamiento térmico, manta de lana mineral doble no superior a 75 y 50mm de espesor.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar cada conjunto de puerta de inspección del precipitador, Realizar limpieza de cada una de las puertas y reemplazar empaques anómalos.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar infiltración y fugas de aire por las puertas, a menudo son audibles preste especial atención a las puertas de acceso al PES y a las tolvas.	Quincenal	Operador del área

6.3.2.2 Aisladores y sistema de calefacción (Resistencias).

Tabla 18

Actividades de mantenimiento propuestas para Aisladores y resistencias de calefacción

Actividad	Intervalo	Delegado
Identificar si los aisladores se encuentran con capas de polvo en la cerámica y partes.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar integridad del cuerpo aislador, limpiar con trapo seco para identificar pequeñas fisuras.	6 meses	Taller eléctrico
Nota: Si el aislador está limpio y la fisura no abrió una grieta estas son permitidas.		
Verificar que los elementos de calefacción se encuentren instalados en su lugar, no se encuentren fracturados o degradados.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar que el compartimento de los aisladores y elementos de calefacción se encuentren bien sellados y sin ingreso de aire y/o humedad del exterior.	6 meses	Taller eléctrico
Medir aislamiento eléctrico de la acometida de los elementos de calefacción (5mA a 1,65 kV).	6 meses	Taller eléctrico
Verificar torque de la acometida de los elementos de calefacción.	6 meses	Taller eléctrico
Medir la resistencia Óhmica de las resistencias de calefacción.	6 meses	Taller eléctrico

Medir corriente en Amperios y Tensión en voltios de cada una de las resistencias de calefacción. (Voltaje: 480 V, Potencia: 1kW/1,5kW)	6 meses	Taller eléctrico
--	---------	------------------

6.3.2.3 Parrillas de distribución de gases (entrada/salida/deflectoras).

Tabla 19

Actividades de mantenimiento propuestas para parrillas de distribución de gases

Actividad	Intervalo	Delegado
Reportar acumulación de acumulación excesiva de polvo (capa de polvo mayor a 1mm).	6 meses	Taller eléctrico
Remover las acumulaciones de polvo en las parrillas de distribución de gases	6 meses	Taller eléctrico
Identificar si las perforaciones de las parrillas de la parrilla de distribución en la entrada se encuentran erosionadas y con diámetro mayor a 85mm de diámetro.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar estado de la sujeción de las parrillas (entrada/salida/deflectoras), que no se encuentren desplazadas, con pernos y tuercas completas, soldadura intacta.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar que las parrillas presencias de corrosión e identificar la cantidad y posición de las mismas.	6 meses	Taller eléctrico

6.3.2.4 Electrodo de emisión

Tabla 20

Actividades de mantenimiento propuestas para los electrodos de emisión

Actividad	Intervalo	Delegado
Verificar acumulación de capas de ceniza anormales en electrodos de emisión, material solidificado en los mismos. Verificar posibles causas, funcionamiento del motor reductor y golpeadores del sistema.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar distancia entre las placas colectoras y marco portaelectrodos (prueba calibrador pasa-pasa) tolerancia de ± 10 mm.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar buen agarre de los electrodos de emisión. Gancho de sujeción sin muestra de desprendimiento.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar electrodos sueltos, identificar ubicación, reportar, remover y reemplazar.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar capas de ceniza anormal en el marco porta electrodos y/o material endurecido.	6 meses	Taller eléctrico

6.3.2.5 Sistema de golpeo

Tabla 21

Actividades de mantenimiento propuestas para el sistema de calefacción

Actividad	Intervalo	Delegado
Verificar que los aisladores eje del sistema de golpeo no se encuentren damnificados.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar si el accionamiento y la transmisión, hasta el eje de los martillos rotativos operen normalmente.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar que los martillos no tengan la tendencia de quedarse trabados y operen normalmente.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar que las grapas de los martillos se encuentren cerradas y con tornillería completa, reportar anomalía, cuantificar e indicar ubicación de las mismas.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar que los martillos no se encuentren con grietas, quebrados o desprendidos. Cuantificar cantidad de martillos anómalos.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar que deformación uniforme de los yunques. La onda de choque del martillo debe ser recibida en el centro del mismo. Estimar % de degradación.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar tornillería, arandelas y tuercas de yunques, chumaceras. Verificar si alguna se encuentra con punto de soldadura. Cuantificar cantidad de tornillería faltante y con punto de soldadura.	6 meses	Taller eléctrico

Identificar holguras en las chumaceras y notificar anomalía. Indicar ubicación de la misma.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar estado de las ruedas dentadas, identificar desgaste en los pines, que no se encuentre desplazadas y acoplen correctamente una con otra. Identificar presencia de corrosión, grietas.	6 meses	Taller eléctrico
Lubricar martillos (recomendación).	6 meses	Taller eléctrico

6.3.2.6 Placas colectoras.

Tabla 22

Actividades de mantenimiento propuestas para las placas colectoras

Actividad	Intervalo	Delegado
Identificar si existen acumulaciones anormales de polvo (Capa de polvo mayor a 1mm), verificar las posibles causas, evaluando si el respectivo motor del golpeador y reductor se encuentren acoplados correctamente.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar ganchos de suspensión de las placas, que no se encuentren separados del punto de fijación. Identificar y cuantificar placas colectoras desprendidas.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar presencia de corrosión en placas colectoras disminución de espesor de placas, menor a 1,5mm.	6 meses	Taller eléctrico

Identificar y cuantificar rotos en placas colectoras, Reportar para respectiva reparación. (Dimensiones: 50X800X12060, Hnom: 15, Material: Acero grado FeP01 Am).	6 meses	Taller eléctrico
Identificar si las placas se encuentran deformadas, cuantificar e identificar ubicación de las mismas.	6 meses	Taller eléctrico

6.3.2.7 Tolvas.

Tabla 23

Actividades de mantenimiento propuestas para las tolvas

Actividad	Intervalo	Delegado
Verificar externamente las láminas de la cubierta, estado de la sujeción de cada lámina, presencia de corrosión o desprendimiento. Cuantificar y reportar ubicación de la misma.	Mensual	Operador del área
Verificar que las puertas se encuentren bien cerradas, estado de las bisagras, estado del empaque, reemplazar si amerita e identificar fugas de aire.	6 meses	Taller eléctrico
Verifique el nivel de las tolvas, este no debe alcanzar el nivel de los electrodos de emisión. Si descubre nivel anormal, verifique que el sistema de barrido accione correctamente.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar material compactado en las paredes de las tolvas, verificar funcionamiento de los vibradores de tolva.	6 meses	Taller eléctrico

Identificar materiales sueltos como martillos, placas o electrodos en el interior de las tolvas.	6 meses	Taller eléctrico
Verificar presencia de oxido y corrosión en tolvas. Identificar presencia y cantidad de humedad ó causa de la anomalía.	6 meses	Taller eléctrico
Identificar estado del aislamiento térmico, manta de lana mineral doble no superior a 75 y 50mm de espesor	6 meses	Taller eléctrico

6.3.2.8 Sistema Air Flushing.

Tabla 24

Actividades de mantenimiento propuestas para el sistema Air Flushing

Actividad	Intervalo	Delegado
Verificar estado de los filtros. Coordinar con servicios generales para realizar limpieza si amerita.	Quincenal	Operador del área
Verificar presencia de oxido y corrosión en soporte de filtros, agujeros, grietas. Coordinar con área de soldadura para reponer el estado del mismo.	Quincenal	Operador del área
Verificar integridad de la malla que cubre el filtro, reportar para reparar o cambiar	Quincenal	Operador del área
Verificar integridad del compartimento de las resistencias de calefacción, medir continuidad del circuito y puesta en operación de las mismas.	6 meses	Taller eléctrico

Verificar estado de los ductos que direccionan el aire, presencia de oxido y corrosión, rotos, estado del aislamiento térmico (se recomienda cada 3 años)	3 años	Taller eléctrico
---	--------	------------------

6.3.2.9 EPIC III.

Tabla 25

Actividades de mantenimiento propuestas para el EPIC III

Actividad	Intervalo	Delegado
Revisar y reajustar todas las todas conexiones eléctricas.	6 meses	Taller eléctrico
Limpiar y aspirar los gabinetes para mantenerlos libres de acumulación de material y contaminación.	6 meses	Taller eléctrico

Para la aprobación e implementación se presentó los resultados anteriormente mostrados al equipo multidisciplinar de la planta Termoguajira, el cual fue aprobado satisfactoriamente. Es importante mencionar que, el paso 9 no está en el alcance de este trabajo debido a la delimitación de permanencia del investigador en la planta.

Conclusiones

- De los resultados obtenidos de la prueba de bondad y ajuste, se comprobó que la distribución Log Normal es la que mejor se ajusta a los tiempos de reparación de los precipitadores electrostáticos, con una acumulación de datos al inicio de la curva PDF, lo que es muy probable que la operación y mantenimiento de los PES en la planta haya presentado falencias en el momento inicial de su operación.
- El MTTR para la distribución Log Normal es de 1428.3 horas, que corresponden a 357 días, lo que indica que se deben reunir esfuerzos para que este tiempo disminuya significativamente dando cumplimiento a los tiempos recomendados en el capítulo 6, manteniendo repuestos disponibles en almacenamiento para que pueda operar nuevamente el equipo con la reparación en los tiempos de inspección estipulados.
- La implementación del método de Duane brindó un panorama de mantenimiento actual en base al historial de los tiempos de reparación, de los resultados obtenidos se concluye enfáticamente que el enfoque de las actividades de mantenimiento en la prevención de las fallas, por lo que es importante recolectar, analizar e interpretar adecuadamente los datos del comportamiento los PES mostrados en el EPIC y en los medidores localizados en el cuarto eléctrico del PES.
- Del análisis de modos de falla se concluye que las fallas mecánicas son de mayor ocurrencia, ocasionadas por la inestabilidad de las condiciones internas del gas de entrada y por los esfuerzos a la que son sometidas todos los componentes debido a el funcionamiento continuo de los precipitadores. Por ende, se debe prestar especial atención en prevenir las fallas que afecten la hermeticidad de los precipitadores ya que las perturbaciones del gas interno es una condición crítica que afecta el rendimiento de los PES.

- El PMO permite concluir que para que sea efectivo el mantenimiento de equipos complejos como los precipitadores electrostáticos, es primordial que Termoguajira invierta en la capacitación de los operadores y de todo el personal de la planta encargada de intervenir los PES de las unidades generadoras, para así, enfocar sus capacidades en la resolución e identificación adecuada de los problemas de diseño, operación y mantenimiento.
- La incursión de los mantenimientos predictivos requiere inversión en equipos que permitan obtener información del detalle de la temperatura, presión y velocidad interna del gas, esto permitiría tener conocimiento del comportamiento en tiempo real de la operación de los PES y facilitaría la toma de decisiones para anteponerse a las fallas. Se sugiere que su adquisición sea considerada a realizar a futuro en Termoguajira para que el monitoreo de la condición del equipo sea preciso.
- El procedimiento de almacenamiento de los eventos de fallos como de intervenciones de mantenimiento de los precipitadores en el CMMS debe mejorarse, diligenciarse en tiempos correctos y estandarizar los términos entre todo el personal de planta, para contar con una base de datos confiable evitando datos atípicos.

Referencias Bibliográficas

[1] Ávila, J. (2020). *Reporte de inspección y reparación de los precipitadores electrostáticos Secos*.

Gecelca termoguajira.

[2] Alstom. (2007). *Rehabilitación de los precipitadores electrostáticos Unidades I y II CentralTérmica Termoguajira*. Corelca.

[3] Alstom, BR-5042-D-1000-0005. (2007). *Manual de operación y mantenimiento*. Power ServiceEnvironmental service.

[4] Alstom. (1995). *EPIC III Manual del operador y descripción de la instalación*. Power ServiceEnvironmental service.

[5] Espinosa, J, Rativa, E. (2021). *Análisis de confiabilidad para equipos de elevación tipo Mainlift(Plataforma de elevación para trabajo en alturas)*. Universidad ECCI.

[6] Fuerza aérea colombiana. *Manual de Confiabilidad Aeronáutica-MACOA-*. (2ª ed). República deColombia.

[7] Garcia, O. (2007). *El sistema PMO: Optimización real del mantenimiento planeado*. Conferencialatinoamericana de Gestión de mantenimiento y confiabilidad operacional GMC 2007.

[8] Gasca, M, Camargo, L, Medina, B. (2017). *Sistema para evaluar la confiabilidad de equiposcríticos en el sector industrial*.

[9] Gallegos, C, Viscaino M, Villacrés, S. (2020). *Estudio de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicado a grupos electrógenos prime*. Conciencia digital.

[10] Gecelca. Página oficial. <https://www.gecelca.com.co/>

- [11] Hernandez, J, Chica, G. (2009). *Modelo para implementación de PMO (Planned maintenance optimization)*. Universidad EAFIT
- [12] Hernandez, J, Chica, G. (2009). *Modelo para implementación de PMO (Planned maintenance optimization)*. Universidad EAFIT
- [13] Modarres, M, Kaminskiy, M, Krivtsov, V. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis, A Practical Guide*. CRC Press.
- [14] Mora, A. (2009). *Mantenimiento planeación, ejecución y control*. (1ª ed). Mexico. Algaomega.
- [15] Moubray, J. (2004). *Reliability-centred Maintenance (RCM) Mantenimiento centrado en confiabilidad*. (2ª ed). Aladon Ltd.
- [16] Mussatti, D. (2002). *Manual de costos de control de contaminación del aire de la EPA*. Oficinade Normas y Planeación de la calidad del aire.
- [17] Oyarce, M. (2014). *Plan de mantenimiento de precipitadores electrostáticos de una planta decelulosa*. Universidad del BÍO-BÍO.
- [18] Ponce, A. (2018). *Optimización del mantenimiento planeado en una línea de producción de bebidas carbonatadas*. Universidad de Piura.
- [19] Pulgarín, S. (2019). *Aproximación de la confiabilidad para optimizar procesos de mantenimiento productivos con Distribución Weibull*. Universidad EAFIT.
- [20] Sanchez, N. (2015). *Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo para los activos de la empresa industria CTS S.A.S*. Universidad Industrial de Santander.
- [21] Turner, S. *PMO-Optimización del plan de mantenimiento (Planned Maintenance Optimisation)*. OMCS Latin America.