

MODELO ESTADÍSTICO PARA LA PREDICCIÓN DE FALLAS POTENCIALES EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN.

MICHAEL STIVEN RINCON SOLER

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA

2019

I

MODELO ESTADÍSTICO PARA LA PREDICCIÓN DE FALLAS POTENCIALES EN REDES
ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN.

MICHAEL STIVEN RINCON SOLER

Informe de práctica empresarial presentado como requisito para optar por el título de ingeniero
electricista.

Asesor: Wilson Salomon Carrera P. M.Sc

Director: Alejandro Garces Ruiz Ph.D

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA

2019

Agradecimientos

Especiales agradecimientos a todas las personas que me apoyaron y asesoraron durante este proceso con el fin de cumplir con los objetivos planteados. Al ingeniero Wilson S. Carrera por su apoyo, enseñanza; y a todas las personas del área de mantenimiento no programado de la unidad operativa Bogotá zona norte.

Al director del proyecto Alejandro Garces Ph.D, por su participación en la ejecución del proyecto, a mis padres por su esfuerzo, paciencia y dedicación constante con mis estudios y a todas la demás personas que ayudaron de manera desinteresada a la conclusión de mi trabajo y que de una u otra manera participaron a la ejecución del mismo.

El Autor.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	4
1 Introducción	5
1.1 Acerca de Enel Codensa S.A ESP	5
1.2 Definición del problema	6
1.3 Justificación	8
1.4 Objetivos.....	9
1.4.1 Objetivo general	9
1.4.2 Objetivos específicos.....	9
2 Formulación matemática.....	10
2.1 Glosario	10
2.2 Clasificación de las fallas	12
2.3 Clasificación de fallas en sistemas eléctricos	13
2.4 Sistema de componentes no reparables	14
2.4.1 Definición.....	14
2.4.2 Mantenimiento	14
2.4.3 Distribución de probabilidad.....	14
2.4.4 Curva típica de flujo de fallas	14
2.4.5 Variables aleatorias continuas y distribuciones de probabilidad	15
2.4.6 Sistema de componentes reparables	25
3 Metodología propuesta.....	29
3.1 Recolección de la información, pronóstico de fallas y orientación de los datos	29
3.2 Procedimiento del modelo	32
3.3 Interfaz de usuario	34
3.3.1 Presentación de los Resultados	36
4 Resultados y análisis	37
5 Conclusiones	65
Bibliografía.....	75

1 Introducción

1.1 Acerca de Enel Codensa S.A ESP

CODENSA S.A ESP. Surge en 1997 tras el proceso de capitalización de la empresa de Energía de Bogotá, encargándose del proceso de distribución y comercialización de la energía eléctrica en la capital, y en todos los municipios de Cundinamarca. Actualmente pertenece al grupo ENEL, multinacional europea que funciona en varios países y abarca gran parte de América Latina. Por tal motivo la participación del mercado en Colombia es de casi 22,36% [1].

Uno de los principales objetivos de ENEL CODENSA S.A ESP. es involucrar apropiadamente las nuevas tecnologías con el fin de atender de manera eficiente, segura y confiable la demanda prevista en su sistema eléctrico. Es por esto que, en los sistemas de distribución, la confiabilidad está altamente relacionada con la continuidad del suministro de energía eléctrica [2], y puede expresarse por una gran variedad de índices. Adicionalmente, es necesario involucrar objetivos que se puedan evaluar teniendo en cuenta la disponibilidad del servicio a sus usuarios, parámetros de cobertura, confiabilidad, calidad, impactos ambientales y sociales. Bajo estos criterios se deben desarrollar planes de mantenimiento en la red de distribución, con el fin de alcanzar las metas que se requieran. Los principales tipos de mantenimiento que se implementan son el preventivo, el predictivo, el sistemático y el correctivo [3].

Por estos motivos ENEL CODENSA S.A ESP. intenta optimizar cada uno de sus procesos y garantizar una excelente calidad del servicio, por lo cual busca continuamente aspectos a mejorar. Uno de estos es la necesidad de realizar un análisis de los datos de falla de componentes, equipos y sistemas, con el objetivo de pronosticar el comportamiento de las redes eléctricas, para una adecuada planeación del mantenimiento. Esto constituye una herramienta eficaz que facilita la toma de decisiones para la operación de los activos de la empresa. De esta forma, un adecuado análisis de datos de fallas permitirá estimar como y cuando presentará una falla, y de esta manera, conocer sus posibles consecuencias, a fin de

programar de manera efectiva el mantenimiento sobre las redes y evaluar la calidad del servicio [3].

Como se menciona anteriormente, el mantenimiento es uno de los principales aspectos que se deben tener en cuenta para la operación de los activos. Por ello existen tres tipos de mantenimiento: preventivo, predictivo y correctivo. El mantenimiento correctivo se hace cuando la falla a ocurrido por tal motivo las inversiones son altas, mientras el mantenimiento predictivo y preventivo busca evitar estas fallas, a fin de mantener en condiciones operativas los componentes de las redes eléctricas [4]. Con esta información en mente, este trabajo pretende realizar un análisis estadístico de los datos de fallas, en las redes eléctricas de distribución de la empresa de ENEL CODENSA S.A ESP, logrando aumentar la confiabilidad de las redes eléctricas, así como predecir y atender potenciales fallas en los sistemas eléctricos de distribución.

1.2 Definición del problema

El mantenimiento tiene como función principal aprovechar el óptimo y adecuado funcionamiento de los equipos, sistemas o procesos, con el fin de mantener al máximo las capacidades y/o funciones que se desarrollan en la industria. Haciendo un barrido a la historia, el desarrollo prolongado de la capacidad industrial de los países conllevó a cambiar la visión que se tenía hasta el momento de lo que se conocía como mantenimiento industrial. Las antiguas técnicas basadas en observaciones periódicas y en las experiencias de los procesos, equipos, fue cambiada por los análisis de información, estrategias y planes de mantenimiento que utilizan nuevos esquemas operativos, procedimientos que hoy se conocen como gestión de activos. Estas nuevas estrategias buscan asegurar los recursos para mantener la disponibilidad de los equipos, la funcionalidad sin ocasionar paradas imprevistas y la efectividad en las acciones que se necesitan para lograr recuperar las unidades falladas. En general los análisis y las estrategias de mantenimiento se han encargado de observar variables controladas para la ejecución de tareas específicas e individuales [5] [6].

Tenemos entonces como primer problema la recolección, representación y organización de los datos de falla debido a la importancia que guardan los mismos con información que puede ser utilizada para determinar la confiabilidad de los sistemas. Esta tarea puede verse interrumpida ya que las industrias no llevan una adecuada organización de los datos que se presentan día a día en la operación, en las actividades diarias no se completan o no se toman de manera adecuada la información de los fallos lo cual causa que los análisis se vean truncados y se presenten casos en los cuales ninguna distribución clásica pueda ajustarse para representar apropiadamente la tasa de fallos del sistema [3].

Por otra parte, los análisis de la información para estudios de confiabilidad han sido sesgados a través del tiempo a sistemas con representaciones fijas, lo que imposibilitan ser comparados con nuevos análisis de tendencias y ajustes debido a que sus datos provienen de sistemas

estáticos y uniformes. Algunos ejemplos de estos casos son los estudios realizados en [7], [8] y [9], donde modelan la confiabilidad del sistema con una situación ya prevista. Como se sabe los estudios de confiabilidad se pueden describir bajo la función de densidad de probabilidad de la cual es necesario determinar los parámetros que representen en totalidad dicha distribución. Uno de los casos más utilizados en la actualidad debido a la aproximación y a la descripción a futuro de dichos comportamientos, se hace a partir de la utilización de los datos históricos de las fallas ocurridas en algún intervalo de tiempo, dicho modelo proporciona una confiabilidad para el sistema en la cual se podrá determinar la vida útil de sus equipos proporcionando un adecuado mantenimiento. Para estos casos es importante tener los suficientes datos como para determinar los parámetros que gobiernan la distribución, en la mayoría de casos los parámetros de forma y escala, por eso es importante acudir a métodos para estimar los mejores parámetros que se ajusten adecuadamente al modelo [5].

En la actualidad, es importante conocer el comportamiento de los sistemas, además de modelar cada uno de estos bajo una distribución característica, debido a la información que puede proporcionar dicha estadística. Es por ese motivo que la ley de fallas bajo el modelo de Weibull es aceptada para la mayoría de los problemas presentes en la confiabilidad de los sistemas eléctricos, pero es importante aclarar que para el buen funcionamiento de dicho modelo es esencial un adecuado estudio de las fallas presentes, conocer exactamente la severidad, las consecuencias, la calidad del servicio, así como el comportamiento y la operación de los sistemas.

ENEL CODENSA S.A ESP cuenta con un área encargada de realizar el mantenimiento de las redes de distribución, esta área conocida como O&M (Operación y Mantenimiento) es la encargada de diseñar los planes de mantenimiento sobre la red de distribución, declarando las criticidades con las cuales se le brinda prioridad a los circuitos según los análisis realizados. La Unidad operativa zona norte al igual que las demás unidades son las encargadas de ejecutar estos planes de mantenimiento según el criterio definido por esta área. A través de los años los ingenieros encargados de la unidad operativa identificaron que los mantenimientos no estaban mejorando los indicadores, y no se estaba dando prioridad a lo que realmente afecta la red, esto los llevo a proponer, y participar en las decisiones en conjunto con esta área para replantear los mantenimientos a ejecutar. Tenían los motivos para decir que los mantenimientos que se están realizando no han mejorado los indicadores como se tenía previsto. Por lo cual diseñaron una metodología de análisis de confiabilidad para predecir fallas mediante un modelo que busca, por medio de distribuciones de probabilidad normal representar cada circuito, con el fin de determinar los tiempos medios de falla, y poder anticiparse a los eventos presentes sobre la red de distribución. El problema con esta metodología estaba relacionado a que no se tenía un estudio completo de las fallas por lo cual este método era limitado. Aparte no se tenía implementado ningún algoritmo que determinara si la distribución normal representaba exactamente los datos históricos de falla para cada circuito. Por este motivo se planteó una solución mediante un estudio de confiabilidad con una metodología de probabilidad por medio de distribuciones de Weibull.

1.3 Justificación

El desarrollo de un modelo estadístico a partir de un análisis de datos en los cuales han sido reportadas fallas en el sistema eléctrico de distribución pueden ser utilizados con el objetivo de analizar, catalogar y predecir, el comportamiento de la red a futuro y realizar un planeamiento del mantenimiento sobre las mismas. Debido al interés de medir la eficiencia de las empresas del sector energético, los entes de distribución se han visto en la tarea de buscar nuevas estrategias que permitan mejorar el desempeño y la calidad de los productos. Por estos motivos en Colombia, dentro del marco regulatorio de la calidad en los sistemas de transmisión regional y distribución local se distinguen dos tipos de indicadores [10], calidad de potencia suministrada y calidad del servicio. Los primeros hacen referencia a aspectos relacionados con la calidad del producto (regulación de voltaje, forma de onda y factor potencia), mientras que los segundos se relacionan con la continuidad en la prestación del servicio [11].

Con base en lo anterior, es importante la identificación de puntos débiles en los sistemas eléctricos. Sin embargo, este aspecto se torna muy complejo debido a los tamaños y las topologías de la red. De esta forma se puede ver que identificar y localizar fallas rápidamente no es un proceso sencillo. Actualmente, estos procedimientos se basan en inspección y verificación visual, revisión de los medidores ubicados en los interruptores de cabecera de las subestaciones y algunos métodos algorítmicos en los cuales se presenta un problema conocido como múltiple estimación, en el cual, no se conoce con certeza en qué punto de la red está ubicada la falla [4].

Por estas condiciones se puede decir que la red del operador CODENSA S.A. ESP está sujeta a este tipo de eventualidades, por lo cual la ocurrencia de fallas sobre el servicio es imprescindible y mucho menos la afectación ni el tiempo de atención para lograr normalizarla. Es por ello, que es urgente definir las capacidades que se tienen para la mitigación de las fallas que se presentan en la red por diferentes fenómenos ya sea la causa.

La CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) en su resolución 015 del 2018 [12], establece que las nuevas metodologías para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica, juegan un papel fundamental a la hora de mantener los estándares de calidad del servicio, así como también los activos de la empresa. De esta forma, se crea la oportunidad de investigar acerca de la implementación de una nueva forma de atender futuros eventos con el fin de que el operador pueda obtener mayor confiabilidad y un aumento significativo en cuanto a los indicadores con los cuales se está midiendo la empresa.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proponer un modelo probabilístico al operador de red ENEL CODENSA S.A ESP que le permita predecir las fallas de los componentes no reparables del sistema de distribución.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Identificar los diferentes factores que han sido tenidos en cuenta por los operadores de red para la predicción de fallas de un sistema de distribución.
- ✓ Identificar el estado actual de ENEL CODENSA S.A ESP respecto a la predicción de fallas del sistema de distribución.
- ✓ Implementar un modelo para la predicción de fallas del sistema de distribución de CODENSA S.A ESP.
- ✓ Determinar los planes de mantenimiento preventivo que se requieren para la mitigación de las fallas encontradas con el modelo.
- ✓ Proponer recomendaciones al operador de red sobre el modelo implementado y los resultados obtenidos.

2 Formulación matemática

2.1 Glosario

Para el análisis y la clasificación de las fallas es necesario definir los siguientes conceptos [3] [13]:

- ✓ Falla: inhabilidad de algún elemento, equipo, proceso o sistema el cual no puede terminar una función determinada.
- ✓ Componente: Elemento que pertenece a algún equipo ya sea eléctrico, mecánico el cual hace parte de los estudios de confiabilidad.
- ✓ Subsistema: Agrupación de elementos o componentes que ejecutan una tarea específica.
- ✓ Sistema: Agrupación de subsistemas interconectados que ejecutan tareas específicas.
- ✓ Disponibilidad: Es la probabilidad de que un sistema opere cuando se necesite, lo cual tiene en cuenta la confiabilidad de cada elemento, su conexión y se supone que existen los recursos para asegurar su funcionamiento.
- ✓ Confiabilidad condicional: Es la probabilidad de que un elemento, sistema o proceso opere en un intervalo de tiempo de manera exitosa debido a que funciona de manera exitosa durante un tiempo específico.
- ✓ Límites de confianza: Son los límites en los cuales se puede presentar un estimado de una distribución. Representan un rango de valores en los cuales los valores estimados están dentro de un porcentaje de tiempo, por ejemplo, para una muestra se realizan varias observaciones en los cuales cada estimación registra parámetros diferentes, analizando la información obtenida y aplicando los límites de confianza se puede obtener un rango en el cual va a ser probable que se produzca un acierto en un porcentaje de veces logrando verificar la utilidad de los datos y certeza de las estimaciones realizadas.

- ✓ Función de distribución acumulada (cdf): Función obtenida después de realizar la integral de uno menos la función de confiabilidad y representa la probabilidad de que un componente opere más de un intervalo de tiempo.
- ✓ Distribución de la falla: Modelo matemático que representa la probabilidad de falla en el tiempo. Nombrado como función de densidad de probabilidad pdf.
- ✓ Tasa de fallas: Función que describe el número de fallas que pueden aparecer en un determinado intervalo de tiempo. Se declara en fallas/hora, fallas/día, fallas/año, etc...
- ✓ Mantenibilidad: Es una probabilidad de que un elemento que fallo sea restaurado en un intervalo de tiempo determinado, término que busca mejorar la capacidad y reducción en los tiempos de reparación de las fallas.
- ✓ Estimación de máxima verosimilitud (MLE): Método para la estimación de los parámetros de una distribución en el cual se maximiza la ecuación de probabilidad. Los mejores resultados determinan los parámetros que maximizan la ecuación de probabilidad para un conjunto de datos.
- ✓ Rangos de la mediana: Son medidas estimadas de la función de distribución acumulada, en la cual los valores determinan la probabilidad que tiene cada falla en una muestra de n unidades falladas. Esta estimación es el resultado de aplicar la ecuación empírica, o existen otros métodos usados tales como la ecuación de Bernard o la ecuación binomial.
- ✓ MTBF (Mean Time Between Failures): Para el caso de los sistemas reparables determina el tiempo medio entre fallas sin considerar los tiempos de reparación y paradas por inspecciones preventivas. En sistemas no reparables determina los tiempos medios antes del fallo y está representado por el valor de vida media.
- ✓ MTTF (Mean Time To Failures): Determina el tiempo medio a la falla y representa el valor medio de vida para una distribución de un sistema no reparable, lo cual indica los tiempos entre reparaciones consecutivas y el tiempo de la próxima falla sobre ese sistema, equipo, elemento, etc...
- ✓ MTTR (Mean Time To Recover): Determina el tiempo medio para reparar, lo cual indica que representa la vida media para una distribución que muestra los tiempos de reparación. Indica el tiempo medio para reemplazar o reparar un componente fallado sin incluir los tiempos de movilización de los recursos, materiales y personal.
- ✓ Función de densidad de probabilidad (pdf): Modelo matemático que representa la probabilidad de que suceda algún evento en el tiempo. Esta función junto con los tiempos medios a falla son las principales funciones con las que se determina la confiabilidad, la tasa de fallos y la vida media de un sistema, equipo, elemento, etc...

- ✓ **Confiabilidad:** Probabilidad de un sistema de mantenerse operativo sin producirse una falla bajo criterios establecidos y en un intervalo de tiempo definido, es decir, es la condición de que un sistema efectúe un trabajo específico en un periodo de tiempo bajo ciertos criterios de operación y una confianza determinada.
- ✓ **Sistema reparable:** Sistema que presenta reparaciones continuando con su operación sin cambiar o sustituir ningún elemento.
- ✓ **Sistema no reparable:** Sistema que presenta reparaciones continuando con su operación, pero en la cual se realizaron cambios, sustituciones o reemplazos de algún elemento del sistema.

2.2 Clasificación de las fallas

Después de la aparición de un fallo en el sistema, se inicia el protocolo establecido por el departamento encargado del mantenimiento con el fin de recuperar lo antes posible el servicio y dar continuidad a la operación. Esto se hace primero identificando cuales han sido los efectos causados al sistema, para proceder a analizar la información obtenida con el fin de buscar la adecuada explicación del modo de falla, debido a esto se logra identificar el cómo ocurrió, por qué ocurrió, la causa y por ultimo determinar la mecánica del fallo. Al distinguir las diferentes causas se logra identificar los tiempos exigidos en los cuales el sistema muestra condiciones no normales de operación.

Es claro que los efectos causados dependen de la conexión de los sistemas en serie o paralelo, pueden encadenar una serie de sucesos no previstos que pueden alterar la causa original del modo de falla, debido a que en circunstancias diversas se puede producir el mismo efecto.

Según la referencia bibliográfica estas son las clasificaciones de los modos de falla [3]:

- ✓ El grado de influencia en la capacidad de trabajo
 - Falla total
 - Falla parcial o incompleta
- ✓ Carácter físico de la aparición
 - Fallas súbitas
 - Fallas por cambios en los parámetros
 - Debido a otros fallos
- ✓ Carácter del proceso de aparición
 - Fallo repentino
 - Fallo gradual o progresivo
- ✓ El tiempo de existencia del fallo
 - Fallos estables
 - Fallos temporales

- Fallos intermitentes
- ✓ Al momento de aparición del fallo
 - Fallos aleatorios
 - Fallos infantiles
 - Fallos por desgaste
- ✓ Información del fallo
 - Fallo activo
 - Fallo pasivo
- ✓ Recolección de datos de falla
 - Fallas primarias
 - Fallas secundarias

2.3 Clasificación de fallas en sistemas eléctricos

La siguiente clasificación de fallas fue extraída de los autores de las anteriores referencias bibliográficas las cuales describen que la salida de líneas en redes eléctricas puede ser así [3] [14] [15] [16]:

- ✓ Por el tiempo (condiciones climáticas): En esta clasificación se evidencian todos los fallos ocasionados por cambios climáticos que pueden ir desde ventiscas, nieves, fríos, inundaciones, temperaturas elevadas.
- ✓ Misceláneos: Este tipo de fallas están involucrados diferentes aspectos como lo son animales, vehículos, fuego, explosiones, vandalismo.
- ✓ Componentes del sistema: Este tipo de fallas se presentan en los componentes del sistema tales como generadores, transformadores, conductores, torres, equipos de protección.
- ✓ Condiciones del sistema: Este tipo de fallas se presentan por inestabilidades del sistema en variables como tensión, corriente, frecuencia.
- ✓ Personal de la compañía: Este tipo de fallas hace referencia a los errores causados por el personal operativo de la empresa como por errores en el sistema de información y mando tele controlado con el que se cuenta.

2.4 Sistema de componentes no reparables

2.4.1 Definición

Está conformado por múltiples elementos o componentes conectados entre sí, los cuales al presentar una falla condicionan al sistema a no poder volver a estar operativos sin reemplazar, sustituir, cambiar el elemento fallado. Cabe aclarar, que la mayoría de elementos eléctricos pertenecen a los sistemas no reparables, por ejemplo, generador, transformador, luminaria, etc... Aunque es relevante decir que algunos elementos pueden ser reparables, se tendrá en cuenta la parte económica, es decir, si es más barato cambiarlo que repararlo [3].

2.4.2 Mantenimiento

El mantenimiento de estos equipos depende de las políticas internas del departamento de análisis o mantenimiento el cual especifica que tratamiento se le debe dar al componente fallado, por tal motivo se parte de esta política para la clasificación pertinente que se debe dar bajo las dos modalidades, sistemas reparables o sistemas no reparables. Se tienen en cuenta, los tiempos de reparación y en el contexto operativo de cada elemento para hacer referencia al sistema que gobierna el mantenimiento.

2.4.3 Distribución de probabilidad

Cada falla se presenta bajo un tiempo operativo del elemento siguiendo una distribución de probabilidad que es conocida o desconocida bajo este modelo de distribución se puede conocer la probabilidad de que cierto elemento funcione dentro de un rango específico u opere aún más del tiempo indicado. Como se presentan bajo un tiempo conocido, estas distribuciones pueden ser continuas y pueden representar variables aleatorias que se encuentran en un intervalo de tiempo definido. De otra parte, cuando no es conocido el tiempo se presentan como distribuciones discretas y representan variables aleatorias que solo pueden tomar un rango de valores discretos.

2.4.4 Curva típica de flujo de fallas

Esta curva agrupa todos los tipos de falla que se pueden presentar en los sistemas, equipos o elementos, a lo largo de un período de tiempo comenzando desde el primer momento en que se puso en operación hasta que acaba o finaliza su tiempo de vida o su ciclo útil. Esta curva representa los diferentes tipos de fallas. Así:



Figura 1. Curva de Davies o de bañera, tomada de [9].

En la figura 1, se pueden notar tres períodos de tiempo en donde se pueden presentar las fallas, cada uno de ellos representa:

- ✓ Fallas Tempranas (I): Las fallas en este período de tiempo se presentan por comienzos de operación con elementos nuevos los cuales pueden traer defectos de fábrica, o por piezas que no se encontraban bien instaladas, esto se debe a falta de capacitaciones en instalación de productos nuevos, o bien por defectos en el material.
- ✓ Fallas Aleatorias (II): Las fallas en este período se presentan como su nombre lo dice aleatoriamente debido a averías en los equipos, ya sea por desgaste propio o por condiciones externas, inesperadas o por sobrecargas imprevistas en la operación.
- ✓ Fallas Por Desgaste u obsolescencia (III): Estas fallas se presentan debido a que cumplen su período de operación, el ciclo útil, y están relacionadas a la edad del equipo, al deterioro y corrosión eléctrico mecánico o por falta de mantenimiento.

2.4.5 Variables aleatorias continuas y distribuciones de probabilidad

2.4.5.1 Variables aleatorias

La variable aleatoria es la categoría que se le da a las variables que pueden tomar un valor dentro de un conjunto de posibles valores tomados de un experimento o muestra en donde el intervalo de valores que pueden tomar sea infinito. Matemáticamente las variables aleatorias se pueden definir como una variable que pertenecen a una función real definida en un espacio maestro de un experimento cualquiera [5].

2.4.5.2 Función densidad de probabilidad (pdf)

La función densidad de probabilidad describe la probabilidad el comportamiento relativo de la variable aleatoria que puede aparecer en cualquier momento en un intervalo de tiempo, representa el comportamiento de una muestra de datos matemáticamente la función de probabilidad se describe de la siguiente manera bajos tres condiciones, siendo t en este caso la variable aleatoria [5]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)dt = 1 \quad (1)$$

$$f(t) \geq 0 \quad (2)$$

$$P(t_1 \leq t \leq t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (3)$$

2.4.5.3 Función de distribución acumulada (cdf)

La función de distribución acumulativa representa la probabilidad que puede llegar a tomar un valor T en una distribución cualquiera, la cual se encuentra menos o igual a un valor t. Es decir, representa el valor acumulado de una distribución. Se entiende como matemáticamente como:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad (4)$$

2.4.5.4 Distribuciones de probabilidad utilizadas en mantenimiento

A continuación, se explican las distribuciones utilizadas en este proyecto [5] [6] [17] [16] [18]:

- ✓ Distribución de probabilidad Normal
- ✓ Distribución de probabilidad Weibull
- ✓ Distribución de probabilidad Gamma
- ✓ Distribución de probabilidad Exponencial
- ✓ Distribución de probabilidad Rayleigh

2.4.5.4.1 Distribución de probabilidad Normal

Esta distribución de probabilidad modela con mucha aproximación diferentes aplicaciones industriales en la actualidad, ya que se ajustan muy bien a el comportamiento de los elementos bajo fallos en la segunda etapa de la curva de Davies, es decir, los sistemas fallados debidos al desgaste. Estas son las ecuaciones que representan el pdf, cdf y la confiabilidad del sistema cuando se comporta bajo la distribución de probabilidad normal.

- ✓ Función de densidad de probabilidad (pdf):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

En donde:

μ : Media (Parámetro de escala)

σ : Desviación estándar (Parámetro de forma)

- ✓ Función de distribución acumulada (cdf):

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (6)$$

- ✓ Confiabilidad:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (7)$$

En la siguiente figura se pueden observar las gráficas de las funciones pdf y cdf.

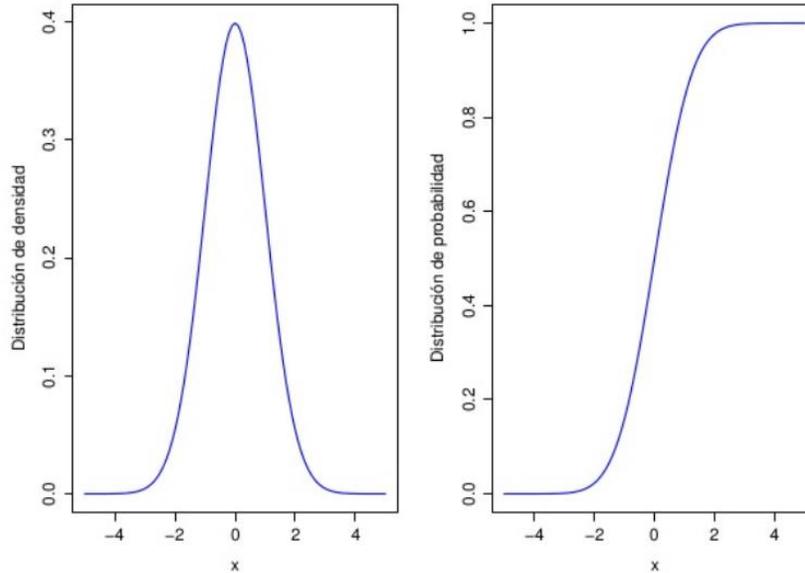


Figura 2. Función pdf y cdf con parámetros $\mu=0$ y $\sigma=1$, tomada de [18].

2.4.5.4.2 Distribución de probabilidad Weibull

Es la distribución más aplicada en cualquiera que sea el campo industrial o en donde sea necesario realizar un estudio de fallas sobre los componentes de algún sistema, ya que permite realizar un estudio de confiabilidad en los tres períodos de la curva de Davies. Esta distribución no tiene una forma definida debido que depende de tres parámetros, los cuales garantizan y aseguran la flexibilidad de la distribución para adaptarse a los datos. En esta distribución pueden aparecer otro tipo de distribuciones, es decir, cuando los parámetros toman ciertos valores se originan casos particulares los cuales se analizan bajo estas otras distribuciones.

Estas son las ecuaciones que representan el pdf, cdf y la confiabilidad del sistema cuando se comporta bajo la distribución de probabilidad Weibull.

✓ Función de densidad de probabilidad (pdf):

$$f(t) = \beta \frac{(t - t_0)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\frac{(t-t_0)^\beta}{\alpha^\beta}} \quad (8)$$

En donde:

t_0 : Parámetro de localización, representa el tiempo en el cual no ocurrió ninguna falla.

β : Parámetro de forma, representa la forma de la función

α : Parámetro de escala, representa la vida media del componente

✓ Función de distribución acumulada (cdf):

$$F(t) = 1 - e^{-t/\alpha^\beta} \quad (9)$$

✓ Confiabilidad:

$$R(t) = e^{-t/\alpha^\beta} \quad (10)$$

En la siguiente figura se pueden observar las gráficas de las funciones pdf y cdf.

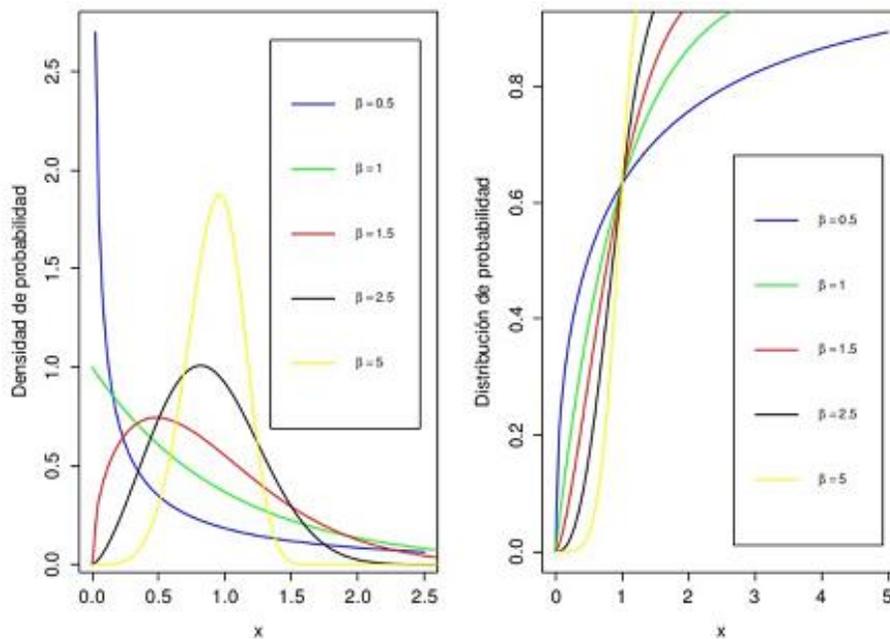


Figura 3. Función pdf y cdf para una distribución Weibull con diferentes valores para α y β , tomada de [18].

En este caso, la distribución de Weibull puede presentar una combinación de sus parámetros tal que se puede decir que existen tres posibles combinaciones, las cuales son:

- ✓ Para $t_0 = 0$, se dice que el sistema no presenta una confiabilidad intrínseca, lo cual quiere decir que no presenta un tiempo de falla que pueda ser observada o declarada.
 - $\beta < 1$, determina el período de arranque o primera etapa de la curva de Davies, lo cual indica que existe fallas por material defectuoso o sobrecargas en el sistema.
 - $\beta = 1$, la tasa de fallos es constante y el modelo se puede describir bajo una distribución Exponencial.
 - $\beta = 2$, el modelo se puede describir bajo una distribución Rayleigh.
 - $\beta > 1$, determina el período de desgaste o la segunda etapa de la curva de Davies.

- $\beta=3.44$, Se puede decir que la distribución Weibull es muy semejante a la distribución normal y se encuentra en la tercera etapa de la curva de Davies.
- ✓ Para $t_0 > 0$, el sistema presenta un tiempo en el cual no ocurren fallas debido que cuenta con una confiabilidad intrínseca.
- ✓ Para $t_0 < 0$, el sistema presenta fallas antes de iniciar la toma de datos, esto puede pasar debido a que no se instalan equipos nuevos, es decir, el elemento ya había sido utilizado o presentado problemas durante el transporte, instalación, ensamble o almacenamiento.

2.4.5.4.3 Distribución de probabilidad Gamma.

Esta distribución es muy similar a la distribución de Weibull, ya que posee los mismos parámetros de esa distribución, con la única diferencia que pueden ser ajustados con gran facilidad para encontrar comportamientos de la etapa uno de la curva Davies. Otras referencias bibliográficas describen que este tipo de distribución en una representación aproximada cuando se presentan fallas de elementos en conexión Stand By.

Estas son las ecuaciones que representan el pdf, cdf y la confiabilidad del sistema cuando se comporta bajo la distribución de probabilidad Gamma.

- ✓ Función de densidad de probabilidad (pdf):

$$f(t) = \frac{t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-t/\beta} \quad (11)$$

En donde:

α : Parámetro de forma, representa la forma de la función

β : Parámetro de escala, representa la vida media del componente

- ✓ Función de distribución acumulada (cdf):

$$F(t) = 1 - \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\beta t} dt \quad (12)$$

- ✓ Confiabilidad:

$$R(t) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\beta t} dt \quad (13)$$

En la siguiente figura se pueden observar las gráficas de las funciones pdf y cdf.

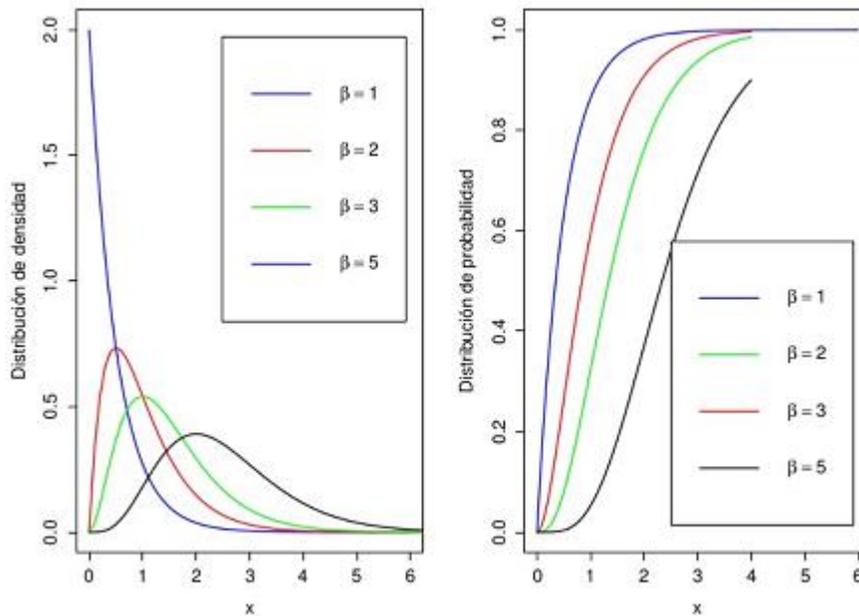


Figura 4. Función pdf y cdf para una distribución Gamma con $\alpha=1$ y diferentes valores para β . tomada de [18].

2.4.5.4.4 Distribución de probabilidad Exponencial.

Esta distribución es un caso particular como se mencionó anteriormente de la función de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull, en donde el parámetro de forma es igual a la unidad. Su función de densidad es muy característica debido a su comportamiento, de ahí es que surge el nombre para esta distribución. Como ya se mencionó, en esta distribución solo se tiene presente un parámetro, el parámetro de escala (α).

Estas son las ecuaciones que representan el pdf, cdf y la confiabilidad del sistema cuando se comporta bajo la distribución de probabilidad Exponencial.

✓ Función de densidad de probabilidad (pdf):

$$f(t) = \alpha e^{-\alpha t} \quad (14)$$

En donde:

α : Parámetro de escala

✓ Función de distribución acumulada (cdf):

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t} \quad (15)$$

✓ Confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\alpha t} \quad (16)$$

En la siguiente figura se pueden observar las gráficas de las funciones pdf y cdf.

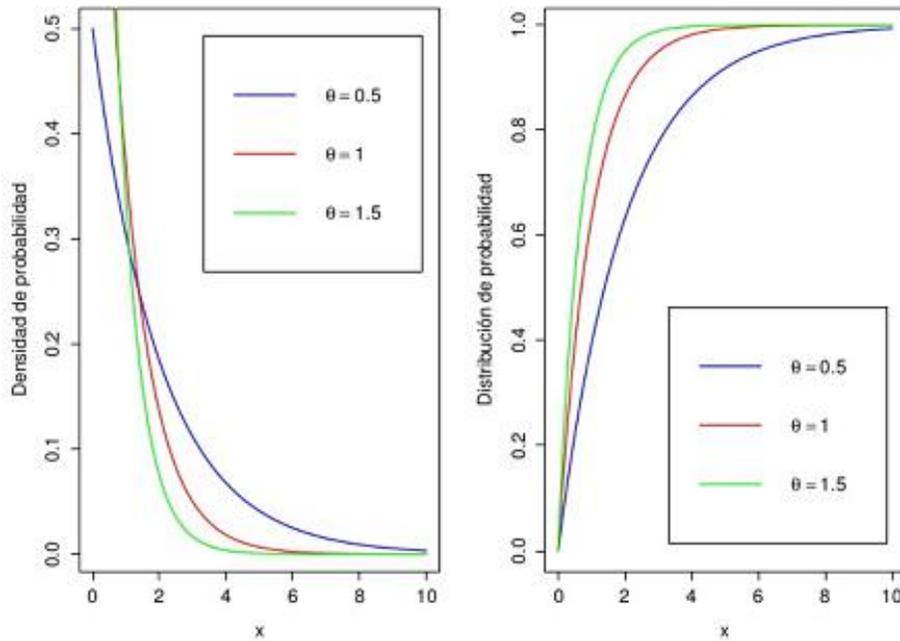


Figura 5. Función pdf y cdf para una distribución Exponencial con diferentes valores para α . tomada de [18].

2.4.5.4.5 Distribución de probabilidad Rayleigh

Esta distribución al igual que la distribución Exponencial son un caso particular como se mencionó anteriormente de la función de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull, en donde el parámetro de forma para este caso equivale a dos. Su función de densidad es muy característica debido a su comportamiento, ya que se puede evidenciar que relaciona la magnitud global de un vector de datos con la dirección de sus componentes.

Estas son las ecuaciones que representan el pdf, cdf y la confiabilidad del sistema cuando se comporta bajo la distribución de probabilidad Rayleigh.

✓ Función de densidad de probabilidad (pdf):

$$f(t) = \frac{2}{\alpha^2} t e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^2} \quad (17)$$

En donde:

α : Parámetro de escala

✓ Función de distribución acumulada (cdf):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^2} \quad (18)$$

✓ Confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^2} \quad (19)$$

En la siguiente figura se pueden observar las gráficas de las funciones pdf y cdf.

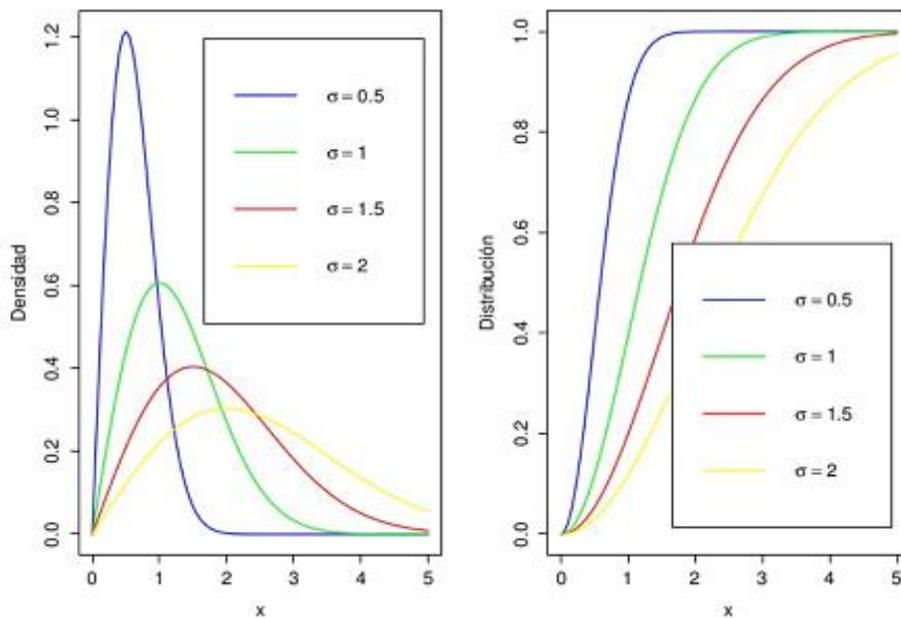


Figura 6. Función pdf y cdf para una distribución Rayleigh con diferentes valores para α . tomada de [18].

2.4.5.5 Funciones de la distribución para el cálculo de confiabilidad

La confiabilidad se puede expresar como probabilidad de que un sistema opere durante un periodo t sin presentar fallas, esto quiere decir que el sistema funcione correctamente bajo ciertos parámetros fijos. Así mismo, aparece la función de probabilidad de fallo que es la misma función de probabilidad acumulada conocida también como inconfiabilidad. Estas funciones de confiabilidad y probabilidad de fallo se muestran como indicadores para la toma de decisiones asertivas frente al sistema tratado. Aunque existen ciertos indicadores que sirven para evaluar, planear y cambiar las estrategias de mantenimiento que se tenían [16] [17].

2.4.5.5.1 Valor esperado, media o MTTF

Representa el tiempo de operación antes de que se produzca el primer fallo. Este valor puede calcularse de la pdf o también de la función de confiabilidad,

$$MTTF = \int_0^t R(\tau) d\tau \quad (20)$$

Dado que en la mayoría de distribuciones contamos con los valores de los parámetros β y α el MTTF presenta las siguientes condiciones:

- ✓ Para $\beta > 1$ el $MTTF < \alpha$
- ✓ Para $\beta < 1$ el $MTTF > \alpha$
- ✓ Para $\beta = 0.5$ el $MTTF = 2\alpha$

2.4.5.5.2 Función de confiabilidad condicional (Teorema de Bayes) o vida residual.

Es una ecuación que muestra la confiabilidad de un sistema que ha operado un tiempo t , en donde existe un tiempo sin falla T . La probabilidad de falla en un nuevo intervalo de tiempo subsiguiente debido a una operación exitosa es llamada confiabilidad condicional. Se calcula de la siguiente manera:

$$R(t/T) = \frac{R(T+t)}{R(T)} \quad (21)$$

Distribuciones	Pdf f(t)	Cdf F(t)	Confiabilidad R(t)	Tiempo medio entre fallas MTTF
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} dt$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} dt$	μ
Weibull	$\beta \frac{(t-t_0)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-(t-t_0)^\beta/\alpha^\beta}$	$1 - e^{-(t-t_0)^\beta/\alpha^\beta}$	$e^{-(t-t_0)^\beta/\alpha^\beta}$	$\alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
Gamma	$\frac{t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha\Gamma(\alpha)} e^{-t/\beta}$	$1 - \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\beta t} dt$	$\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\beta t} dt$	$\frac{\beta}{\alpha}$
Exponencial	$\alpha e^{-\alpha t}$	$1 - e^{-\alpha t}$	$e^{-\alpha t}$	α
Rayleigh	$\frac{2}{\alpha^2} t e^{-(\frac{t}{\alpha})^2}$	$1 - e^{-(\frac{t}{\alpha})^2}$	$e^{-(\frac{t}{\alpha})^2}$	$\alpha\Gamma\left(\frac{3}{2}\right)$

Tabla 1. Características de las distribuciones para cálculos de confiabilidad de los sistemas no reparables.

2.4.6 Sistema de componentes reparables

2.4.6.1 Definición

Sistema conformado por múltiples elementos o componentes conectados entre sí, en los cuales ocurre una falla y pueden volver a restablecer su operación ya sea por un mantenimiento correctivo dado que están funcionando inadecuadamente o están causando una mala operación del sistema, o realizando la reparación del elemento defectuoso. Cabe aclarar que un elemento reparable es el que en su vida útil puede llegar a tener más de una reparación, es decir, ocurre más de una falla en el sistema [3].

2.4.6.2 Protocolo de reparación

Los sistemas eléctricos y electromecánicos suelen tener equipos costosos que son difíciles de cambiar o sustituir ya sea por el costo elevado del equipo, o por el costo que puede llegar a producir retirarlos del sitio, e instalar el siguiente. Por lo que existen dos metodologías para el reemplazo o reparación de los equipos:

- ✓ La primera metodología es conocida como mantenimiento preventivo el cual se desarrolla con el elemento fuera de servicio o (downtime), el cual se hace retirando el elemento para llevarlo a adecuación y restauración de materiales con operación dudosa o inadecuada. Esto se realiza para mantener el elemento como si estuviera en óptimas condiciones, y así garantizar una considerable reducción de fallas sobre el sistema.
- ✓ La segunda metodología es conocida como mantenimiento correctivo el cual se desarrolla cuando el elemento presentó una falla, y no puede volver al estado operativo por lo cual debe ser reemplazado en su totalidad.

2.4.6.3 Tiempos de Reparación y mantenimiento

Si se habla de reparación se puede hablar entonces de la presencia de un fallo sobre el sistema, lo cual implica una atención urgente para darle solución oportuna a la falla. En estos casos, se debe tener presente todos los tiempos necesarios para dicha reparación. Estos tiempos se agrupan en:

- ✓ El tiempo de localización de la falla
- ✓ El tiempo para reunir los repuestos
- ✓ El tiempo de desplazamiento para llevar los repuestos
- ✓ El tiempo de aseguramiento de zona de trabajo (5 reglas de oro)
- ✓ El tiempo de reparación
- ✓ El tiempo para puesta en marcha de nuevo

2.4.6.4 Modelos de solución para sistemas reparables.

2.4.6.4.1 Cadenas discretas de Markov

Las cadenas de Markov son aplicables a la solución de este tipo de sistemas cuando se tiene conocimiento de que el sistema presenta falta de memoria, es decir, el estado siguiente es independiente del estado actual, así mismo el estado actual es independiente del estado pasado. Este modelo se define entonces como [3] [16]:

$$P_{ij} = P[X(t_n) = j / X(t_{n-1}) = i] \quad (22)$$

Siendo P_{ij} la probabilidad para pasar de un estado i en un tiempo t_{n-1} a un estado j en un tiempo t_n , asumiendo que la probabilidad es estacionaria en el tiempo. Lo cual entonces depende solo de la variable del tiempo, para este caso entonces la cadena de Markov es estacionaria en el tiempo lo cual quiere decir que la probabilidad de pasar de un estado a otro en la misma en el tiempo pasado y futuro.

Para este caso en particular el estudio de la confiabilidad está representado por una variable discreta en donde el tiempo puede ser continuo o discreto, lo que indica que el espacio esta normalmente representado. Para una variable discreta entonces se tendrá la cadena de Markov como la solución en cuanto a confiabilidad del sistema, ya que define todos los espacios y toma las probabilidades de transición para ir de un estado i a un estado j en un sistema de infinitos estados. Estas probabilidades se describen bajo la siguiente matriz:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0n} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n0} & P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

La matriz anterior representa entonces la matriz transicional entre estados para una cadena de Markov. Se caracteriza por ser una matriz cuadrada ($n \times n$) por que la suma de las probabilidades de cada fila debe ser igual a la unidad.

A manera de ejemplo, supongamos un sistema de 2 estados, el caso más común es que el estado 1 representa la operación del sistema, el estado 2 representa la falla ocurrida.

La matriz transicional quedaría de la siguiente forma:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

En donde:

P_{11} : Representa la probabilidad de mantenerse en el estado 1 en un tiempo t_{n+1} debido a que se mantuvo en el estado 1 en un tiempo t_n .

P_{12} : Representa la probabilidad de pasar al estado 2 en el tiempo t_{n+1} debido a que se encontraba en el estado 1 en un tiempo t_n .

P_{22} : Representa la probabilidad de mantenerse en el estado 2 en un tiempo t_{n+1} debido a que se mantuvo en el estado 2 en un tiempo t_n .

P_{21} : Representa la probabilidad de pasar al estado 1 en el tiempo t_{n+1} debido a que se encontraba en el estado 2 en un tiempo t_n .

En la siguiente figura se muestra el diagrama transicional entre estados.

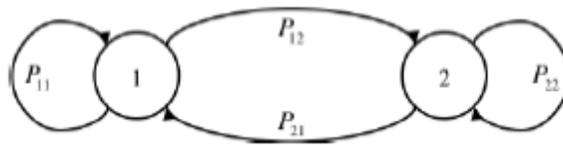


Figura 7. Cadena de Markov para un sistema de 2 estados, tomado de [3].

2.4.6.4.2 Proceso continuo de Markov

Este proceso está relacionado con el sistema discreto mencionado anteriormente, con la diferencia que para este proceso existen estados discretos conocidos, pero continuos en el tiempo, lo cual indica que mientras el proceso se mantiene en un estado este es continuo hasta que ocurre una transición, por lo cual esta transición toma otro estado continuo diferente al anterior [3].

Para modelar este proceso se deben identificar varios aspectos tales como:

- ✓ La tasa de transición: Representa el número de veces que ocurren transiciones en un estado definido en un tiempo esperado.
- ✓ Evaluación de probabilidades dependientes: Esta evaluación considera un estado dt suficientemente pequeño como para ser despreciado, en el cual existe una pequeña probabilidad de estar operativo o fallado en este intervalo de tiempo.
- ✓ Evaluación de las probabilidades en estado límite: Representan las probabilidades límites que puede tomar cada espacio estado operativo o fallado, existen casos de sistemas reparables simples en los cuales se pueden evaluar dichas probabilidades cuando la variable t tienda a infinito.

3 Metodología propuesta

3.1 Recolección de la información, pronóstico de fallas y orientación de los datos

La recolección de la información fue desarrollada mediante uno de los softwares con los que cuenta la unidad operativa en la cual se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos [19]:

- ✓ Nivel de tensión (MT)
- ✓ Actividades validadas, cumplimentadas, cerradas
- ✓ Actividades desarrolladas bajo alguna tipología de falla diferente de trabajos programados y trabajos en tensión.
- ✓ Actividades ejecutadas en los circuitos pertenecientes a la unidad operativa Bogotá
- ✓ No se tuvieron en cuenta eventos relacionados a trabajos o maniobras realizados para mantenimiento preventivo.
- ✓ No se tuvieron en cuenta eventos en los cuales no existió afectación del servicio hacia los clientes, como también eventos transitorios de menos de 3 minutos, ya que estos eventos según la CREG son excluibles para compañías distribuidoras del servicio eléctrico.

El software con el que se extrae la información del histórico de fallas genera un archivo .txt, el cual se pre-procesa mediante la ayuda del software de Microsoft Excel permitiendo ordenar la información de las fallas presentadas en intervalos de tiempo definidos, que para nuestro caso serán intervalos de tiempo por año. Cabe aclarar que nuestra variable independiente (tiempo de falla), esta medida en días. Se procede a realizar un análisis de datos para determinar cuál fue la causa principal de la salida del circuito, para esto se elaboró un listado de fallas, las cuales se presentan descritas en la tabla 2.

Por último, según [3] [14], la información consultada en estas referencias indican que los datos obtenidos presentan dos tipos de comportamientos en donde los resultados históricos de falla se dividen en dos casos: sistemas reparables y no reparables. Entendidos estos dos

sistemas, los modelos se determinan por el método tradicional de solución para confiabilidad del sistema o mediante los métodos de Poisson homogéneo y no homogéneo. Así se determinan las variables de entrada para el análisis en donde se puede observar el tiempo de falla como variable aleatoria continua, la cual se puede representar bajo un modelo probabilístico tradicional. A continuación, se muestra la metodología para determinar los sistemas:

Fallas en redes de distribución	
Aislador	Estribos
Animales	Estructuras
Apoyos	Fusibles MT
Arboles	Fusibles BT
Asociada	Globos
AT	Grapas
Bajantes MT	Inundaciones
Bajantes BT	Maniobras
Barraje	No determinada
Cable XLPE	Pararrayos
Caja de Maniobras	Pases MT
Celdas	Pases BT
Codos	Programado
Cometas	Red BT
Conductores	Regulación
Cortacircuitos	Seccionamientos
Crucetas	Salidas BT
Descargas Atmosféricas	Terceros
Elementos Extraños	Terminales
Empalmes	Templetes
Equipos (RC, SZ)	Transformadores
Equipos de Medida	Transitorios
Error operadores terreno	Traslados de carga

Tabla 2. Clasificación de fallas en el sistema de distribución.

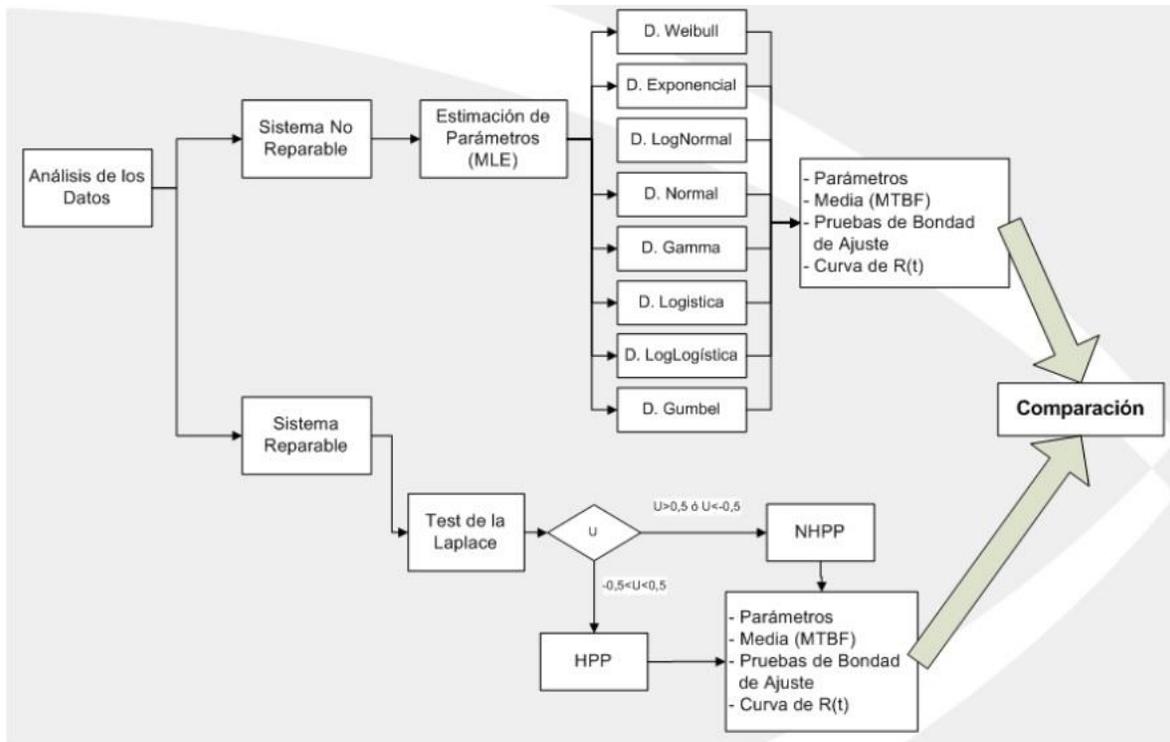


Figura 8. Metodología de análisis de datos, tomado de [20].

Por lo cual y mediante el estudio de [3], se clasificaron las fallas de acuerdo a la siguiente tabla:

Sistema No Reparable	
Aisladores	Crucetas
Animales	Pararrayos
Apoyos	Pases MT
Arboles	Seccionamientos
Bajantes MT	Empalmes
Bajantes BT	Equipos
Barrajes	Equipos de medida
Cable XLPE	Estribos
Cajas de Maniobra	Estructuras
Celdas	Fusibles MT
Codos	Grapas
Conductores	Terminales
Cortacircuitos	Transformadores

Tabla 3. Clasificación de fallas en sistemas no reparables.

Como se mencionó anteriormente en este informe el modelo a implementar para el estudio de confiabilidad y así mismo de predicción de fallas en la unidad operativa Norte, es el modelo de sistemas no reparables que para este caso cubre el 56,5% de las fallas. De esta forma, en cuanto a indicadores suman en promedio 54,25 minutos de SAIDI para los años

mencionados anteriormente, lo cual es el 72,24% del total de SAIDI causado por la unidad en esos años. Respecto a la cantidad de fallas en promedio, se cuenta con 1675 fallas lo que representa el 60% de la cantidad total de las mismas. Como se puede ver el modelo cubre más del 50% tanto en indicadores como en cantidad de fallas, por lo que representaría un porcentaje aceptable para determinar la confiabilidad de los circuitos que pertenecen a la unidad operativa, así se podrán ajustar los planes de mantenimiento para las redes eléctricas en el tiempo posterior al análisis a desarrollar.

3.2 Procedimiento del modelo

El área de mantenimiento no programado o correctivo cuenta la información para desarrollar un modelo de confiabilidad que le permita optimizar y planear los mantenimientos sobre la red de una manera más eficiente, eficaz y procurando mejorar la calidad en la prestación del servicio, por lo cual es necesario determinar con mayor certeza los comportamientos de los equipos con el fin de poder predecir las fallas y poder modelar los períodos de vida de cada componente.

La ingeniería fundamentada en principios de confiabilidad destaca factores en base a los análisis de las causas de fallas por medio de los históricos de las mismas, organizados de tal manera que convierten modelos probabilísticos en métodos determinísticos, los cuales proporcionan predicciones con el fin de disminuir la fallas, que en nuestro caso corresponden a redes eléctricas de distribución urbana. La confiabilidad se calcula mediante un proceso aceptado por varios países, en donde existen procedimientos estadísticos que demuestran la correlación de las distribuciones con los datos reales en los cuales optimizan el error matemático en las formulaciones con las cuales se calcula la confiabilidad. En la Figura 2, se muestra un modelo integral propuesto para la medición de la confiabilidad la cual está basado en el estudio de indicadores de CMD (Confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad) [20] [14].

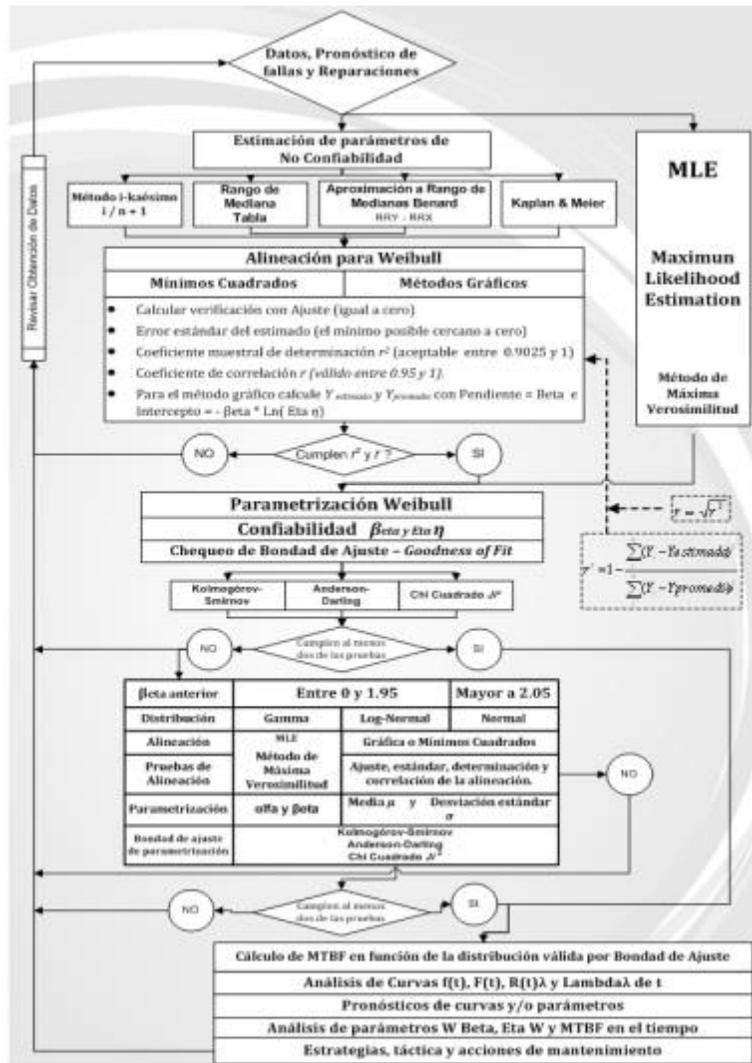


Figura 9. Modelo integral propuesto para la medición de la confiabilidad, tomado de [20].

A continuación, se listan las herramientas utilizadas con su respectivo aporte metodológico:

- ✓ SDE: aplicación corporativa en donde se encuentran los históricos de fallas, como se mencionó anteriormente mediante de esta aplicación se descargaron los históricos de fallas en un archivo .txt para cada año respectivamente.
- ✓ Microsoft Excel: Se utilizó para desarrollar el algoritmo presentado en la figura 9, en el cual se organizó la información, luego se clasificó según la causa de falla y, por último, determinar los tiempos de falla ordenados cronológicamente para cada circuito

- ✓ Matlab R2018a: Software con el que se programó el algoritmo de la figura 10, para luego desarrollar una aplicación de interfaz entre usuario/máquina para mostrar los resultados obtenidos con base en la entrada de datos seleccionada. Allí se presentan los parámetros estimados de la distribución Weibull para cada circuito, luego se proceden a evaluar los test para determinar si las hipótesis se aceptan o se rechazan, con el fin de ajustar un modelo a los datos bajo alguna distribución de probabilidad. Se muestran las gráficas de la función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulada, además permite evaluar la confiabilidad de cada circuito para una misión con un tiempo definido por el usuario. Por último, permite mediante uso del teorema Bayes, determinar la confiabilidad respecto a la última falla; es decir, evaluar cuál es la probabilidad de falla si presenta un funcionamiento correcto durante un tiempo determinado.

3.3 Interfaz de usuario

Una interfaz de usuario es la relación que existe entre el usuario y el código desarrollado en donde se encuentra el algoritmo o el entorno programado. Tiene como función principal mostrar los resultados generados a partir de la ejecución de un código el cual analiza una información determinada, en este caso bases de datos con información de históricos de fallos sobre las redes eléctricas. En este entorno se muestra los resultados para un tiempo determinado que puede ser escogido por el usuario, el cual calcula la distribución que mejor represente al circuito bajo los datos ingresados. El usuario tendrá la opción de escoger el circuito con sus parámetros calculados con el fin de observar las gráficas de función de densidad (pdf), la gráfica de distribución acumulada junto con la gráfica de confiabilidad del sistema.

Se debe definir un ingreso de datos para los cuales se diseñó una lista “list-box”, la cual contiene todas las bases de datos históricas junto con el consolidado de información. El entorno programado está diseñado para ejecutar los cálculos con un nivel de significancia de 0.05, parámetro que representa el máximo error que se puede aceptar para dar la valides a las hipótesis de los test ejecutados de Kolmogorov-Smirnov, Anderson Darling y Chi cuadrado.

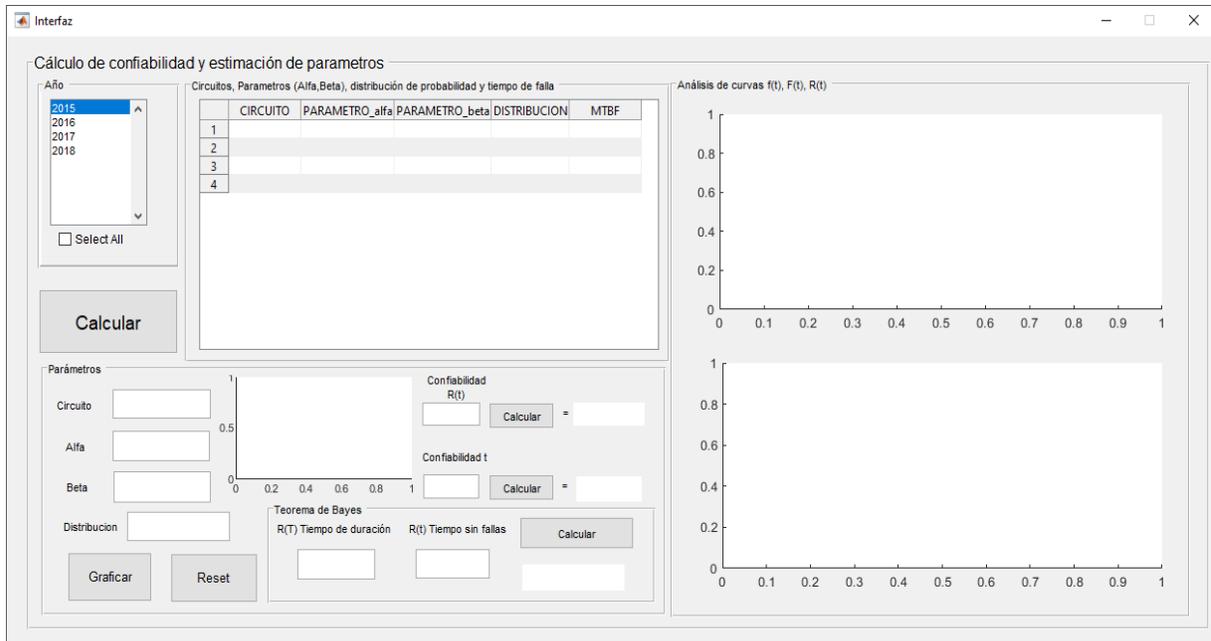


Figura 10. Interfaz de usuario.

En la anterior figura, se puede evidenciar la presencia de varios “pushbutton”. Funciones que vienen integradas en la interfaz para calcular ciertos resultados.

- ✓ Calcular (pushbutton1): Mediante este elemento de la interfaz se hace el análisis de la base de datos, mediante el algoritmo mostrado en la figura 9. Este comando determina los parámetros, la distribución que mejor representa al sistema y el MTTF característico. Los cuales son mostrados en la tabla “table1” que se encuentra al lado derecho de dicho botón.
- ✓ Graficar (pushbutton2): Este elemento de la interfaz permite graficar las funciones pdf, cdf y de confiabilidad del sistema, aunque previamente deben haberse cargado los parámetros presionándolos de la tabla donde se encuentran los resultados obtenidos.
- ✓ Calculo de confiabilidad o tiempo (pushbutton3 y pushbutton4): Estos elementos lo que hacen es calcular la confiabilidad y/o el tiempo respectivamente, ingresando previamente los valores para los cuales se quiere calcular, es decir, el usuario deberá ingresar los valores. Una vez ingresados los valores al oprimir uno de estos elementos se obtendrá el valor de confiabilidad y/o tiempo respectivamente.
- ✓ Calcular “Teorema de Bayes” (pushbutton5): Este elemento calcula la probabilidad condicional al haber ingresado los valores de tiempo sin falla y el tiempo para el cual se quiere determinar la operación sin falla.
- ✓ Reset (pushbutton6): Este elemento limpia la información de las gráficas y de los demás valores ingresados por el usuario, además de limpiar las gráficas calculados

con el anterior elemento. Es recomendable que cada vez que se realice un cálculo para un circuito, se presione el botón de reset para limpiar la ventana.

3.3.1 Presentación de los Resultados

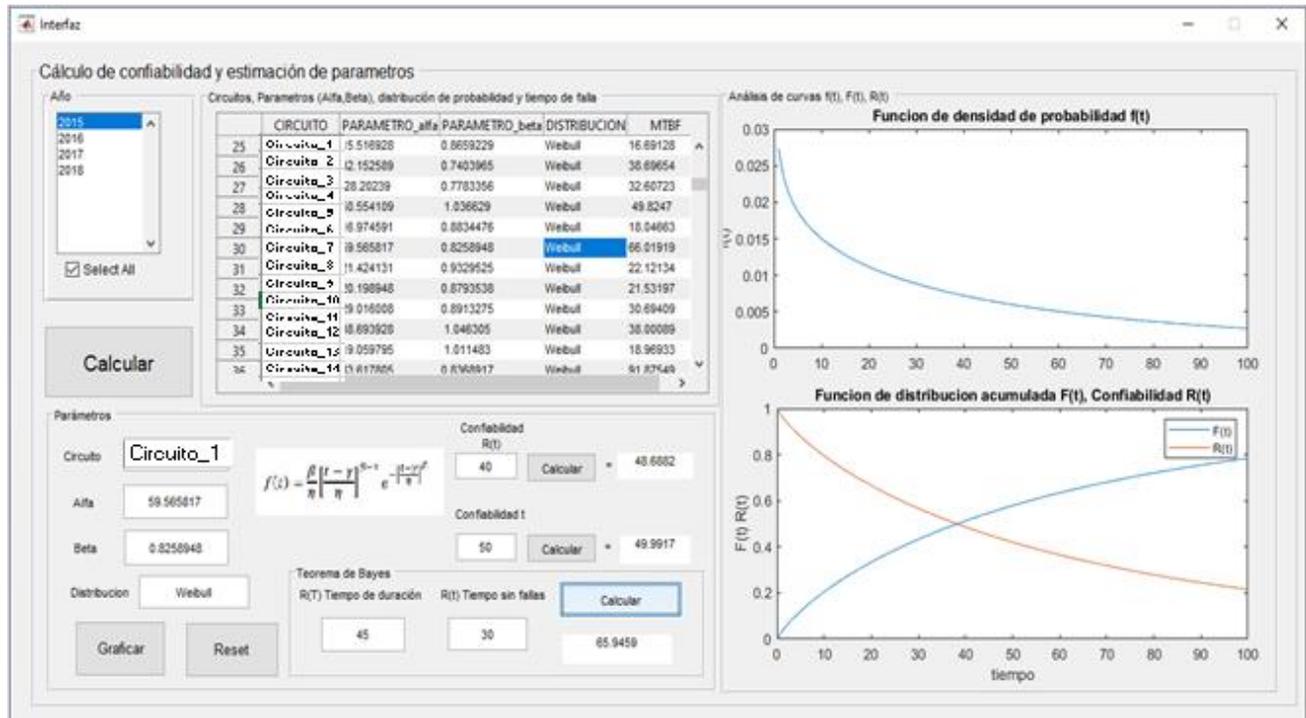


Figura 11. Presentación de resultados con la interfaz desarrollada.

La figura 11, muestra los resultados obtenidos por la interfaz, se puede evidenciar que se cargaron los parámetros del circuito “Circuito_1”, para luego calcular su función pdf, cdf y la función de confiabilidad. Este proceso se desarrolló como se mencionaron en los pasos descritos anteriormente en los cuales se evidencia que primero se deben cargar los datos en la tabla, para luego obtener las funciones, así como también el estudio de confiabilidad que se desea realizar sobre este circuito. En este caso el Circuito_1 tomó los siguientes valores:

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 59,5656
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 0,8225
- ✓ Para un valor de tiempo de 40 días se tiene una confiabilidad de la operación de 48,88%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 50 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 45 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 65,94%

4 Resultados y análisis

Se realizaron los estudios de confiabilidad mediante el entorno programado diseñado, la interfaz gráfica, en primer lugar, se clasificaron las fallas para los años descritos en el procedimiento. Con base en estos resultados obtenidos se tienen 5 casos, para los cuales se estudian los comportamientos de los circuitos de la unidad. Los circuitos están ordenados alfabéticamente y por seguridad de la información serán nombrados como “Circuito_1”, “Circuito_2”, así sucesivamente hasta nombrar todos los circuitos obtenidos bajo el entorno programado, garantizando que para todos los años se mantenga el mismo orden.

Antes de mostrar los resultados, con la selección de datos seleccionada por el usuario, cabe resaltar que no se cuenta con un modelo que pueda comparar los resultados obtenidos de los parámetros de distribución por el método de máxima verosimilitud, por lo que se analizan 10 datos aleatorios de cada prueba para comparar los resultados. Este otro modelo para realizar la estimación de los parámetros es el método de mínimos cuadrados para la función de Weibull.

Caso 1.

Datos de entrada histórico de fallas del año 2015.

Distribución	Cantidad de circuitos	Parámetro β				Parámetro α			
		$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\alpha < 20$	$20 < \alpha < 40$	$40 < \alpha < 60$	$\alpha > 60$
Normal	52	14	-	38	-	12	26	10	4
Weibull	96	55	-	37	4	38	45	5	8
Gamma	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exponencial	1	-	1	-	-	1	-	-	-
Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4. Resultados caso 1 (año 2015).

- ✓ Para este caso se simularon 149 circuitos con sus respectivos datos de fallas en el transcurso del año.
- ✓ La simulación muestra que 52 circuitos se pueden representar bajo una distribución normal, así mismo, 96 de ellos bajo una distribución de Weibull y 1 bajo una distribución Exponencial.
- ✓ Para la distribución normal se puede ver que 14 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, los otros 38 circuitos se encuentran con valor de beta (β) entre 1 y 4.
- ✓ Para la distribución Weibull se puede ver que 55 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, 37 circuitos se encuentran con valor beta (β) entre 1 y 4, y 4 circuitos presentan un valor beta (β) mayor a 4.
- ✓ El parámetro alfa (α) indica la vida característica del circuito, es decir, se tiene una probabilidad del 63,2% falle durante ese tiempo. Por lo cual, esto indica que 41 circuitos tienen la probabilidad de fallar dentro de 0 a 20 días, 71 circuitos dentro de 20 a 40 días, 15 circuitos dentro de 60 a 80 días y 12 circuitos después de 60 días.

Circuito	Distribución	Muestra	AlfaRL	BetaRL	AlfaMV	BetaMV	Error Alfa	Error Beta
Circuito_1	Weibull	25	12,4033	0,963139	12,58667	0,95373	1,46%	0,99%
Circuito_2	Weibull	30	8,13096	0,957302	8,241366	0,92284	1,34%	3,73%
Circuito_3	Pocos_datos	1	1	-0,10080	38	Inf	97,37%	Inf
Circuito_4	Weibull	8	34,9527	0,558980	32,57114	0,701737	7,31%	20,34%
Circuito_5	Weibull	5	66,2947	0,963705	64,17171	1,091906	3,31%	11,74%
Circuito_6	Weibull	9	22,8649	0,568746	21,89296	0,674213	4,44%	15,64%
Circuito_7	Weibull	11	30,6029	0,898462	30,39203	0,939130	0,69%	4,33%
Circuito_8	Weibull	17	18,2382	0,992676	18,42689	0,913538	1,02%	8,66%
Circuito_9	Normal	10	27,9430	0,854668	26,46986	1,097799	5,57%	22,15%
Circuito_10	Normal	8	46,5932	1,362795	31,96099	0,941823	45,78%	44,70%

Tabla 5. Comparación entre métodos para el cálculo de parámetros α y β año 2015

- ✓ AlfaRL: Parámetro de alfa calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ AlfaMV: Parámetro de alfa calculado por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ BetaRL: Parámetro de beta calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ BetaMV: Parámetro de beta calculado por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ Para los circuitos que son representados bajo la distribución Weibull se encuentran similitudes con el parámetro alfa (α), por lo que para temas de análisis se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ Caso contrario sucede con el parámetro beta (β), se encuentran algunos circuitos con diferencias considerables, esto se debe a que la muestra de datos fue pequeña, lo que

provoca un desvío considerable en el método de mínimos cuadrados ya que este depende directamente de los datos. De igual manera se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud, aunque se concluye que el tamaño de los datos es pequeño y no se logra una exacta representación.

Se muestran dos ejemplos tomados de la interfaz desarrollada:

✓ Distribución Normal

Figura 12. Aplicación de la interfaz, circuito_20.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 53,76803
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 2,939149
- ✓ Para un valor de tiempo de 50 días se tiene una confiabilidad de la operación de 98%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 13 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 30 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 1,6989%.

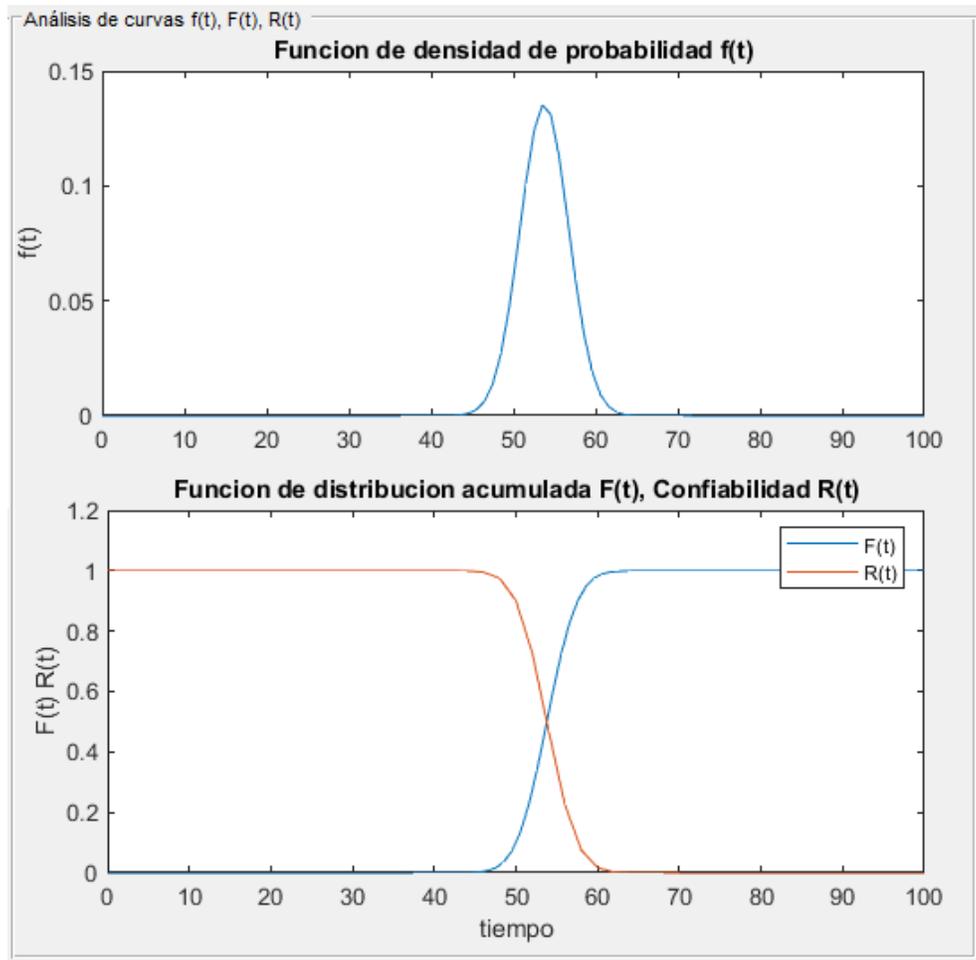


Figura 13. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_20.

✓ Distribución Weibull

Parámetros

Circuito: Circuito_117

Alfa: 33.86428

Beta: 0.9101619

Distribucion: Weibull

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

Confiabilidad $R(t)$: 40 = 31.2345

Confiabilidad t: 50 = 25.7898

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duracion: 45

R(t) Tiempo sin fallas: 30

= 46.4537

Figura 14. aplicación de la interfaz, circuito_117.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 33,86428
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 0,91016
- ✓ Para un valor de tiempo de 40 días se tiene una confiabilidad de la operación de 31,23%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 26 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 45 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 46,45%.

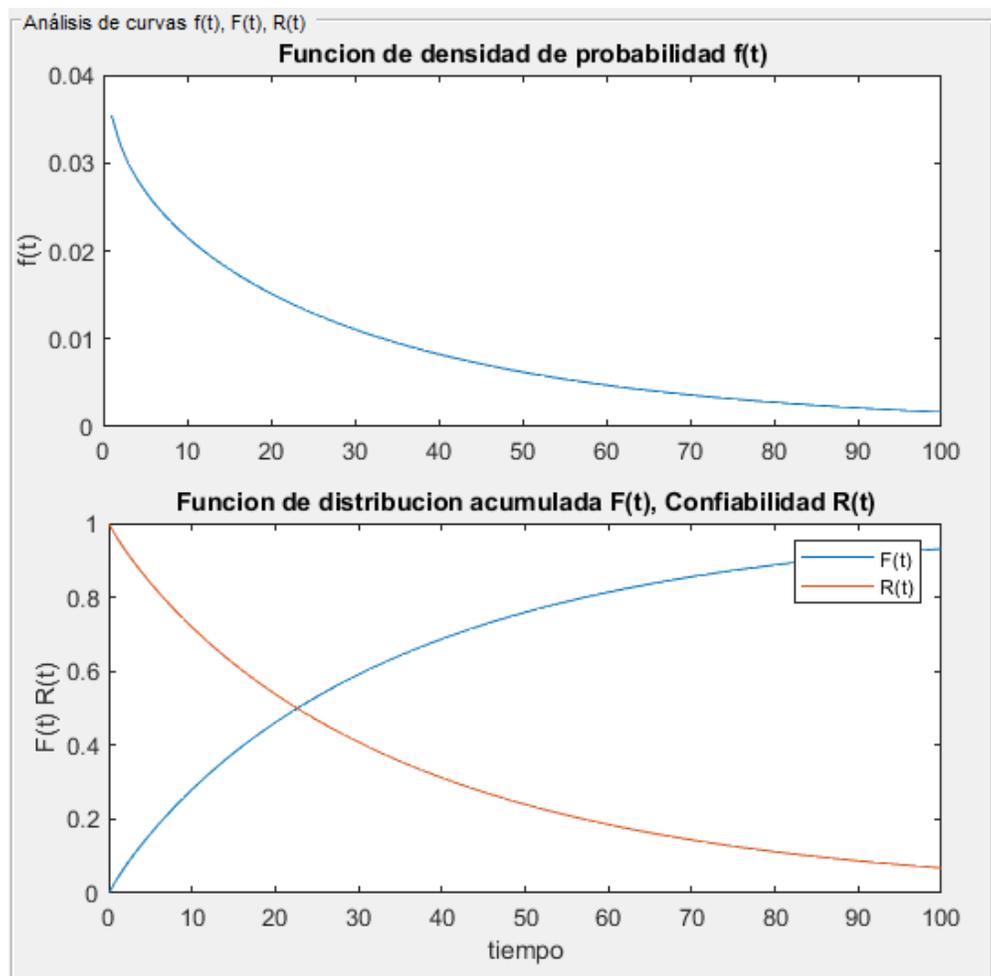


Figura 15. Curvas pdf ,cdf y confiabilidad para el circuito_117.

Caso 2.

Datos de entrada histórico de fallas del año 2016.

Distribución	Cantidad de circuitos	Parámetro β				Parámetro α			
		$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\alpha < 20$	$20 < \alpha < 40$	$40 < \alpha < 60$	$\alpha > 60$
Normal	47	13	-	34	-	5	21	11	10
Weibull	105	60	-	41	4	43	37	9	16
Gamma	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exponencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6. Resultados caso 2 (año 2016).

- ✓ Para este caso se simularon 152 circuitos con sus respectivos datos de fallas en el transcurso del año.
- ✓ La simulación muestra que 47 circuitos se pueden representar bajo una distribución normal, así mismo, 105 circuitos se representan bajo una distribución Weibull.
- ✓ Para la distribución normal se puede ver que 13 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, los otros 34 circuitos se encuentran con valor de beta (β) entre 1 y 4.
- ✓ Para la distribución Weibull se puede ver que 60 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, 41 circuitos se encuentran con valor beta (β) entre 1 y 4, y 4 circuitos presentan un valor beta (β) mayor a 4.
- ✓ El parámetro alfa (α) indica la vida característica del circuito, es decir, se tiene una probabilidad del 63,2% que falle durante ese tiempo. Por lo cual, esto indica que 48 circuitos tienen la probabilidad de fallar dentro de 0 a 20 días, 58 circuitos dentro de 20 a 40 días, 20 circuitos dentro de 60 a 80 días y 26 circuitos después de 60 días.

Circuito	Distribución	Tamaño_ N	AlfaRL	BetaRL	AlfaMV	BetaMV	Error Alfa	Error Beta
Circuito_1	Weibull	32	9,41865	0,93436	9,47409	0,95211	0,59%	1,87%
Circuito_2	Weibull	13	21,5573	0,93031	21,3719	0,99867	0,87%	6,85%
Circuito_3	Pocos_dat	1	1	-0,08010	96	Inf	98,96%	Inf
Circuito_4	Pocos_dat	1	1	-0,06427	293	Inf	99,66%	Inf
Circuito_5	Weibull	13	18,4171	0,81961	18,1902	0,77325	1,25%	5,99%
Circuito_6	Weibull	2	106,114	0,95837	94,3855	1,80748	12,43%	46,98%
Circuito_7	Normal	5	73,6636	0,58815	62,2202	0,96740	18,39%	39,20%
Circuito_8	Weibull	9	22,3846	0,82405	21,4701	0,95989	4,26%	14,15%
Circuito_9	Normal	7	31,2002	0,82974	29,5607	1,10077	5,55%	24,62%
Circuito_10	Weibull	20	13,4682	0,77272	13,4475	0,81838	0,15%	5,58%

Tabla 7. Comparación entre métodos para el cálculo de parámetros α y β año 2016.

- ✓ AlfaRL: Parámetro de alfa calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ AlfaMV: Parámetro de alfa calculado por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ BetaRL: Parámetro de beta calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ BetaMV: Parámetro de beta calculado por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ Para los circuitos que son representados bajo la distribución de Weibull se encuentran similitudes con el parámetro alfa (α), por lo que para temas de análisis se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ Caso contrario sucede con el parámetro beta (β), se encuentran algunos circuitos con diferencias considerables, esto se debe a que la muestra de datos fue pequeña, lo que provoca un desvío considerable en el método de mínimos cuadrados ya que este depende directamente de los datos. De igual manera se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud, aunque se concluye que el tamaño de los datos es pequeño y no se logra una exacta representación.

Se muestran dos ejemplos tomados de la interfaz desarrollada:

- ✓ **Distribución Normal**

Parámetros

Circuito: Circuito_31

Alfa: 33.61865

Beta: 0.635988

Distribucion: Normal

Graficar

Reset

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

Confiabilidad R(t): 35 = 1.49288

Confiabilidad t: 50 = 36.6401

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duración: 20

R(t) Tiempo sin fallas: 10

100

Figura 16. Aplicación de la interfaz, circuito_31.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 33,61865
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 0,6359
- ✓ Para un valor de tiempo de 35 días se tiene una confiabilidad de la operación de 1,49%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 36,64 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 10 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 20 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 100%.

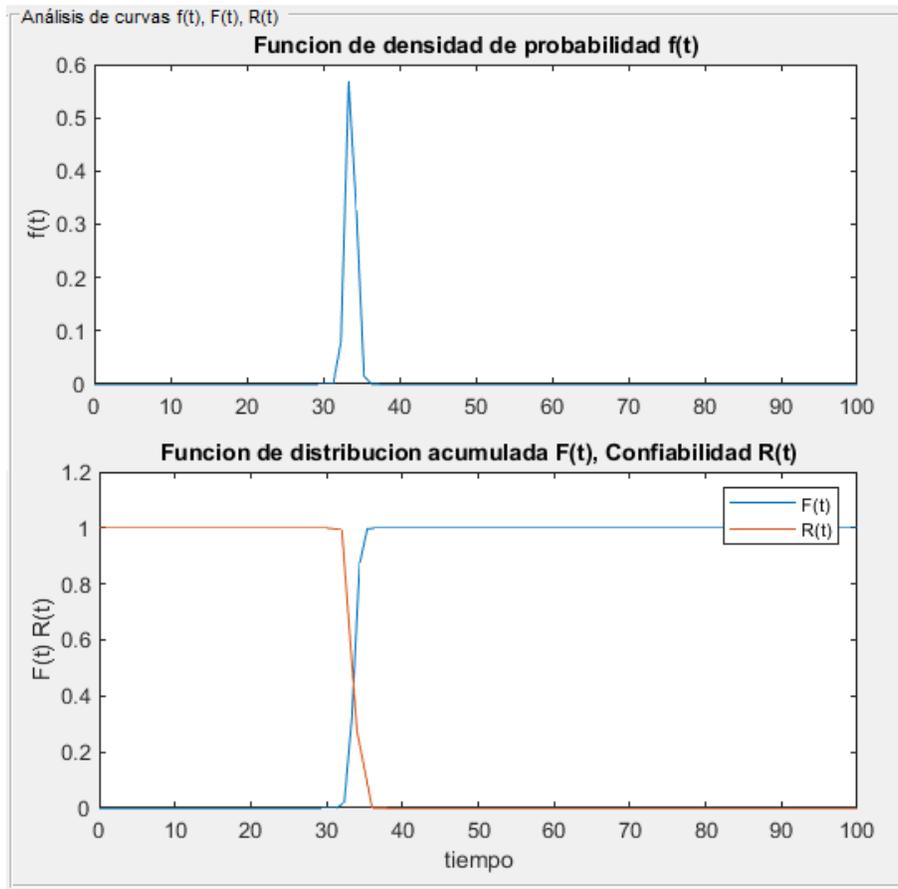


Figura 17. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_31.

✓ **Distribución de Weibull**

Parámetros

Circuito: Circuito_119

Alfa: 10.53975

Beta: 0.8636947

Distribucion: Weibull

Graficar

Reset

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

Confiabilidad R(t): 30 = 8.47429

Confiabilidad t: 50 = 8.45854

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duracion: 15

R(t) Tiempo sin fallas: 20

= 23.1478

Figura 18. Aplicación de la interfaz, circuito_119.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 10,5397
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 0,86369

- ✓ Para un valor de tiempo de 30 días se tiene una confiabilidad de la operación de 8,47%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 9 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 20 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 15 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 23,145%.

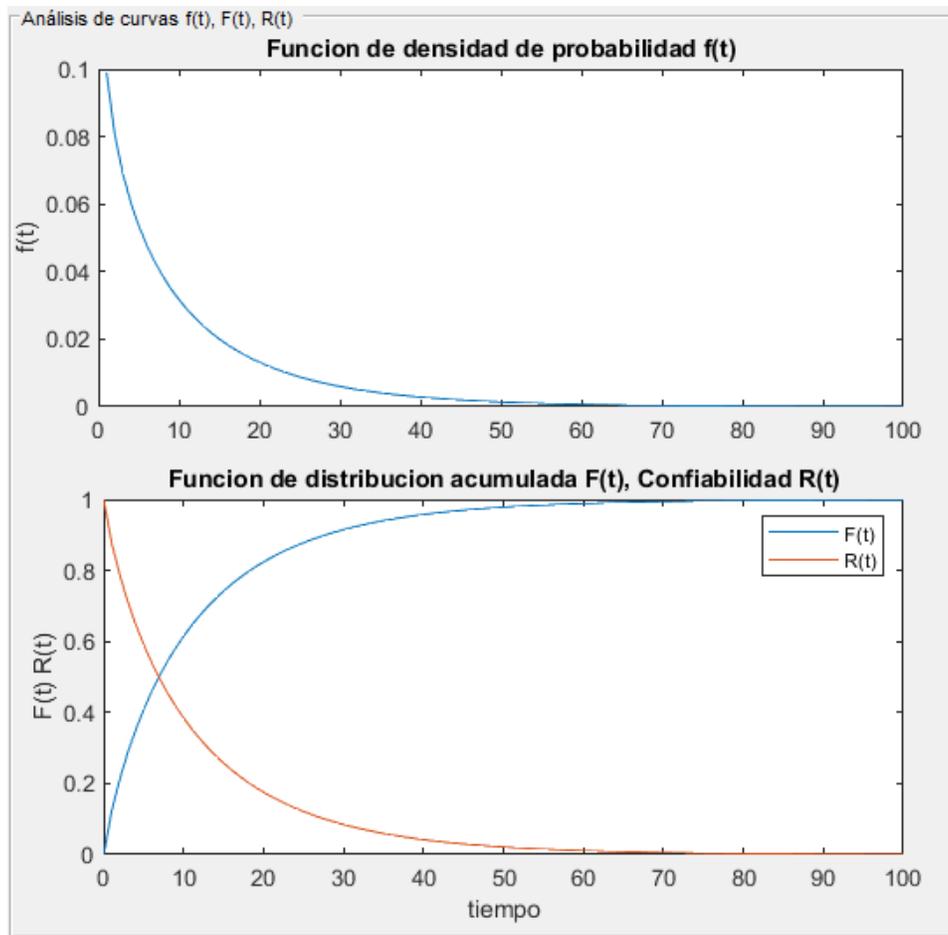


Figura 19. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_119.

Caso 3.

Datos de entrada histórico de fallas del año 2017.

Distribución	Cantidad de circuitos	Parámetro β				Parámetro α			
		$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\alpha < 20$	$20 < \alpha < 40$	$40 < \alpha < 60$	$\alpha > 60$
Normal	50	8	-	41	-	4	22	15	9
Weibull	104	53	-	48	3	50	34	4	16
Gamma	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exponencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rayleigh	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 8. Resultados caso 3 (año 2017).

- ✓ Para este caso se simularon 159 circuitos con sus respectivos datos de fallas en el transcurso del año.
- ✓ La simulación muestra que 50 circuitos se pueden representar bajo una distribución normal, así mismo, 104 circuitos se representan bajo una distribución Weibull.
- ✓ Para la distribución normal se puede ver que 8 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, los otros 41 circuitos se encuentran con valor de beta (β) entre 1 y 4.
- ✓ Para la distribución Weibull se puede ver que 53 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, 48 circuitos se encuentran con valor beta (β) entre 1 y 4, y 3 circuitos presentan un valor beta (β) mayor a 4.
- ✓ El parámetro alfa (α) indica la vida característica del circuito, es decir, se tiene una probabilidad del 63,2% que falle durante ese tiempo. Por lo cual, esto indica que 54 circuitos tienen la probabilidad de fallar dentro de 0 a 20 días, 56 circuitos dentro de 20 a 40 días, 19 circuitos dentro de 60 a 80 días y 25 circuitos después de 60 días

Circuito	Distribución	Tamaño_ N	AlfaRL	BetaRL	AlfaMV	BetaM V	Error Alfa	Error Beta
Circuito_1	Weibull	17	12,9309	0,945862	12,9995	0,97024	0,53%	2,51%
Circuito_2	Weibull	19	19,3501	0,921312	19,0772	1,03229	1,43%	10,75%
Circuito_3	Pocos_dat	1	1	-0,06551	269	Inf	99,63%	Inf
Circuito_4	Normal	7	56,8148	1,032572	53,4022	1,37680	6,39%	25,00%
Circuito_5	Weibull	2	138,528	5,448370	135,745	10,2705	2,05%	46,95%
Circuito_6	Weibull	2	168,055	1,457264	155,581	2,74711	8,02%	46,95%
Circuito_7	Weibull	10	38,1312	1,394923	38,031	1,37991	0,26%	1,09%
Circuito_8	Weibull	19	12,8549	1,185074	12,9954	1,16449	1,08%	1,77%
Circuito_9	Weibull	20	14,1020	0,998504	13,9749	1,12354	0,91%	11,13%
Circuito_10	Weibull	40	7,21895	0,945158	21,6306	0,72410	66,63%	30,53%

Tabla 9. Comparación entre métodos para el cálculo de parámetros α y β año 2017.

- ✓ AlfaRL: Parámetro de alfa calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ AlfaMV: Parámetro de alfa calculado por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ BetaRL: Parámetro de beta calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ BetaMV: Parámetro de beta calculado por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ Para los circuitos que son representados bajo la distribución de Weibull se encuentran similitudes con el parámetro alfa (α), por lo que para temas de análisis se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ Caso contrario sucede con el parámetro beta (β), se encuentran algunos circuitos con diferencias considerables, por lo que se escogen los resultados obtenidos por el método de máxima verosimilitud, aunque se concluye para estos circuitos que el tamaño de los datos no es suficiente, y para el caso del circuito_10 que cuenta con una muestra considerable de datos. Este caso se presenta debido a que este circuito presentó valores de falla cercanos al origen y otros lejos del el, por lo que la linealización de la función Weibull no representa aproximadamente los datos, por tal motivo se escoge el valor obtenido por el método de máxima verosimilitud.

Se muestran dos ejemplos tomados de la interfaz desarrollada:

✓ Distribución Normal

Parámetros

Circuito: Circuito_39

Alfa: 61.52969

Beta: 2.729384

Distribucion: Normal

Graficar

Reset

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

Confiabilidad R(t): 55 = 99.163

Confiabilidad t: 50 = 15.6259

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duración: 40

R(t) Tiempo sin fallas: 20

71.2415

Figura 20. Aplicación de la interfaz, circuito_39

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 61,529
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 2,7293
- ✓ Para un valor de tiempo de 55 días se tiene una confiabilidad de la operación de 99,16%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 16 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 20 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 40 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 71,2415%.

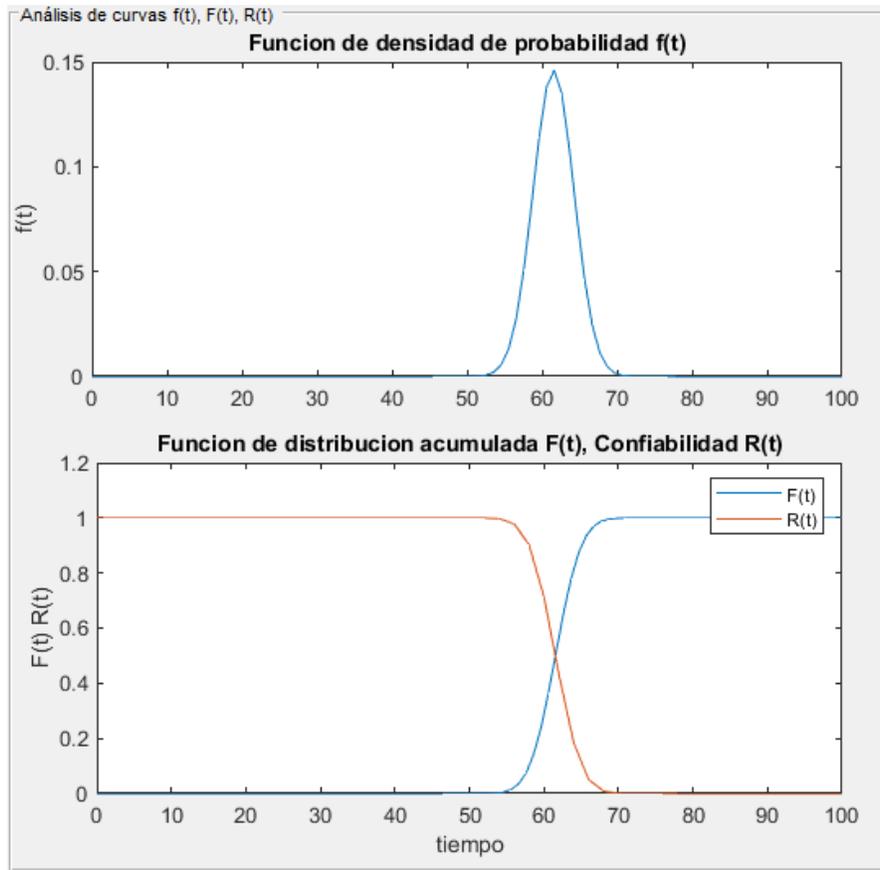


Figura 21. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_39.

✓ **Distribución Weibull**

Parámetros

Circuito

Alfa

Beta

Distribucion

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

Confiabilidad R(t)

=

Confiabilidad t

=

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duración R(t) Tiempo sin fallas

Figura 22. Aplicación de la interfaz, circuito_166.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 19,58721
- ✓ Parámetro beta (β) con valor de 1,1574
- ✓ Para un valor de tiempo de 30 días se tiene una confiabilidad de la operación de 19,43%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 12 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 15 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 15,19%.

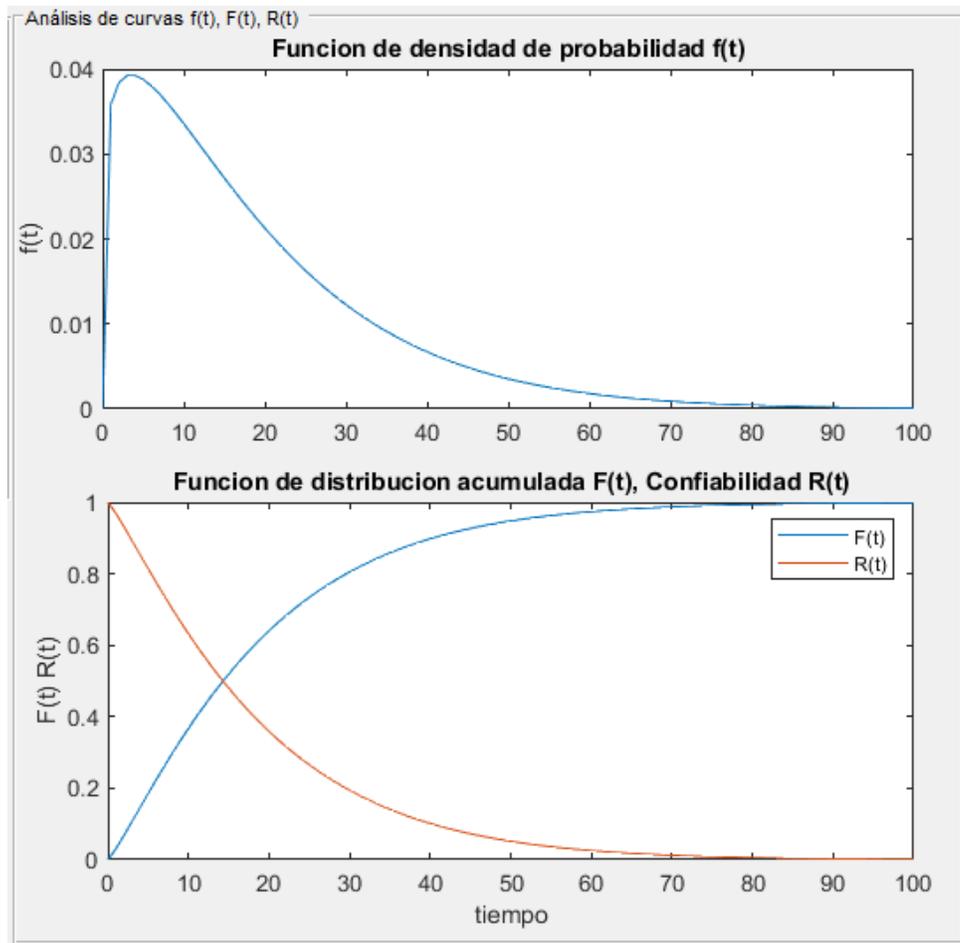


Figura 23. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_166.

Caso 4.

Datos de entrada histórico de fallas del año 2018.

Distribución	Cantidad de circuitos	Parámetro β				Parámetro α			
		$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\alpha < 20$	$20 < \alpha < 40$	$40 < \alpha < 60$	$\alpha > 60$
Normal	68	11	-	57	-	4	22	15	9
Weibull	78	39	-	36	3	40	20	10	8
Gamma	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exponencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rayleigh	1	-	-	1	-	1	-	-	-

Tabla 10. Resultados caso 4 (año 2018).

- ✓ Para este caso se simularon 147 circuitos con sus respectivos datos de fallas en el transcurso del año.
- ✓ La simulación muestra que 68 circuitos se pueden representar bajo una distribución normal, así mismo, 78 circuitos se representan bajo una distribución Weibull y 1 bajo una distribución Rayleigh.
- ✓ Para la distribución normal se puede ver que 11 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, los otros 57 circuitos se encuentran con valor de beta (β) entre 1 y 4.
- ✓ Para la distribución Weibull se puede ver que 39 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, 36 circuitos se encuentran con valor beta (β) entre 1 y 4, y 3 circuitos presentan un valor beta (β) mayor a 4.
- ✓ El circuito que está representado bajo la distribución Rayleigh presenta un valor de β igual a 2, es decir, sus datos fueron ajustados debido a que no se logró representar bajo una distribución Weibull.
- ✓ El parámetro alfa (α) indica la vida característica del circuito, es decir, se tiene una probabilidad del 63,2% que falle durante ese tiempo. Por lo cual, esto indica que 44 circuitos tienen la probabilidad de fallar dentro de 0 a 20 días, 42 circuitos dentro de 20 a 40 días, 25 circuitos dentro de 60 a 80 días y 17 circuitos después de 60 días.

Circuito	Distribución	Tamaño_N	AlfaRL	BetaRL	AlfaMV	BetaMV	Error Alfa	Error Beta
Circuito_1	Normal	11	22,1836	0,792062	21,0615	1,04599	5,33%	24,28%
Circuito_2	Normal	7	34,9505	0,741763	33,1189	0,94207	5,53%	21,26%
Circuito_3	Normal	5	44,0681	1,097560	42,6093	1,31889	3,42%	16,78%
Circuito_4	Weibull	5	49,6610	1,452296	48,0816	1,55237	3,28%	6,45%
Circuito_5	Normal	6	42,6258	2,025835	41,8946	2,36326	1,75%	14,28%
Circuito_6	Pocos_dat	1	1	-0,14779	12	Inf	91,67%	Inf
Circuito_7	Weibull	4	56,2715	0,808908	52,2880	0,98276	7,62%	17,69%
Circuito_8	Normal	7	28,1415	0,728393	25,7968	0,98157	9,09%	25,79%
Circuito_9	Weibull	3	65,5865	1,027815	59,5395	1,82110	10,16%	43,56%
Circuito_10	Weibull	2	15,2992	0,515409	12,4084	0,98239	23,30%	47,54%

Tabla 11. Comparación entre métodos para el cálculo de parámetros α y β año 2018.

- ✓ AlfaRL: Parámetro de alfa calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ AlfaMV: Parámetro de alfa calculado por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ BetaRL: Parámetro de beta calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ BetaMV: Parámetro de beta calculado por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ Para los circuitos que son representados bajo la distribución de Weibull se encuentran similitudes con el parámetro alfa (α), por lo que para temas de análisis se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ Caso contrario sucede con el parámetro beta (β), se encuentran algunos circuitos con diferencias considerables, esto se debe a que la muestra de datos fue pequeña, lo que provoca un desvío considerable en el método de mínimos cuadrados ya que este depende directamente de los datos. De igual manera se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud, aunque se concluye que el tamaño de los datos es pequeño y no se logra una exacta representación.

Se muestran dos ejemplos tomados de la interfaz desarrollada:

- ✓ **Distribución Normal**

Parámetros

Circuito: Circuito_23

Alfa: 28.23271

Beta: 0.9780846

Distribucion: Normal

Graficar

Reset

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

Confiabilidad R(t): 25 = 99.9525

Confiabilidad t: 50 = 20.0079

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duración: 10

R(t) Tiempo sin fallas: 20

3.53898

Figura 24. Aplicación de la interfaz, circuito_23.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 28,232
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 0,9780
- ✓ Para un valor de tiempo de 25 días se tiene una confiabilidad de la operación de 99,95%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 20 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 20 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 10 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 3,538%.

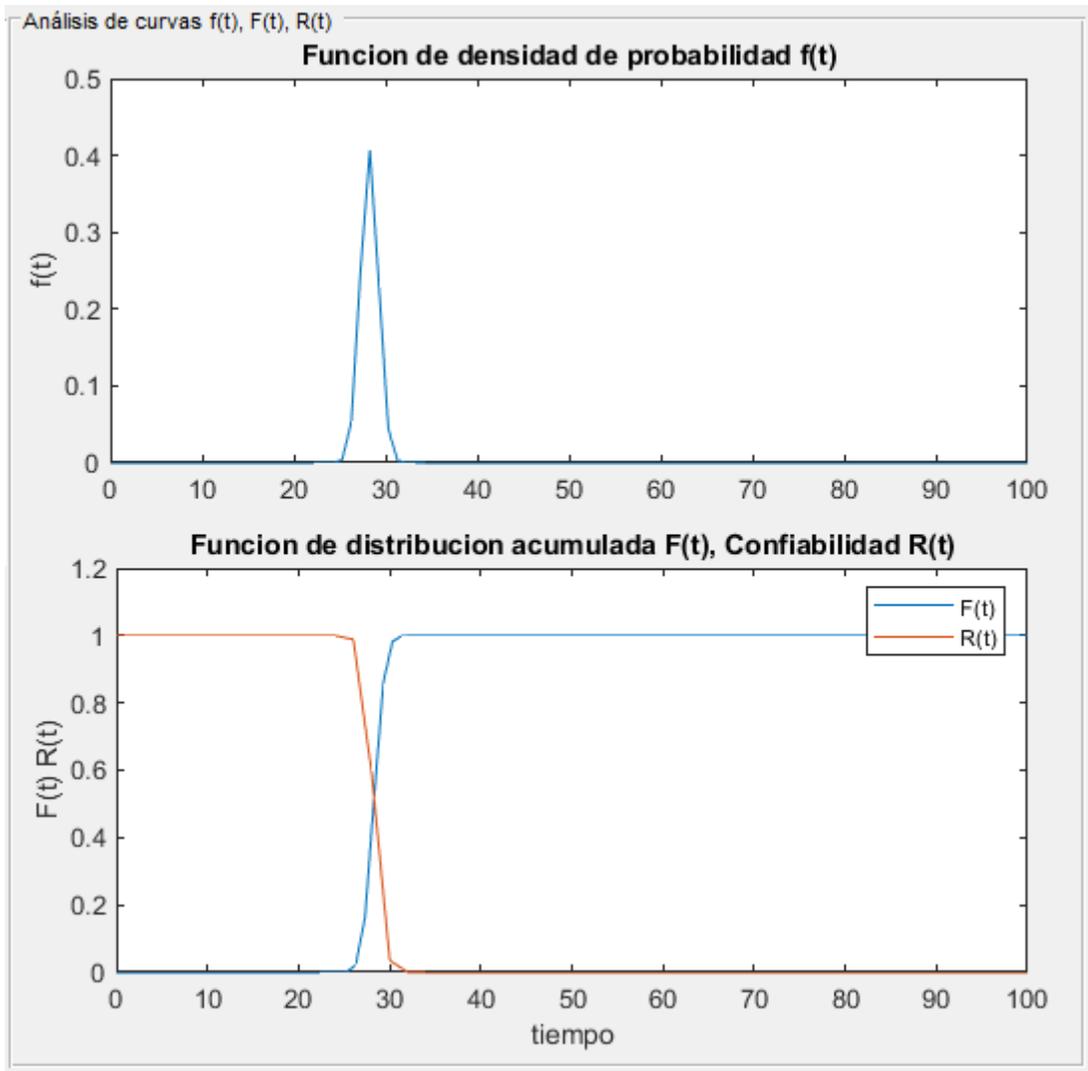


Figura 25. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_23.

✓ **Distribución Weibull**

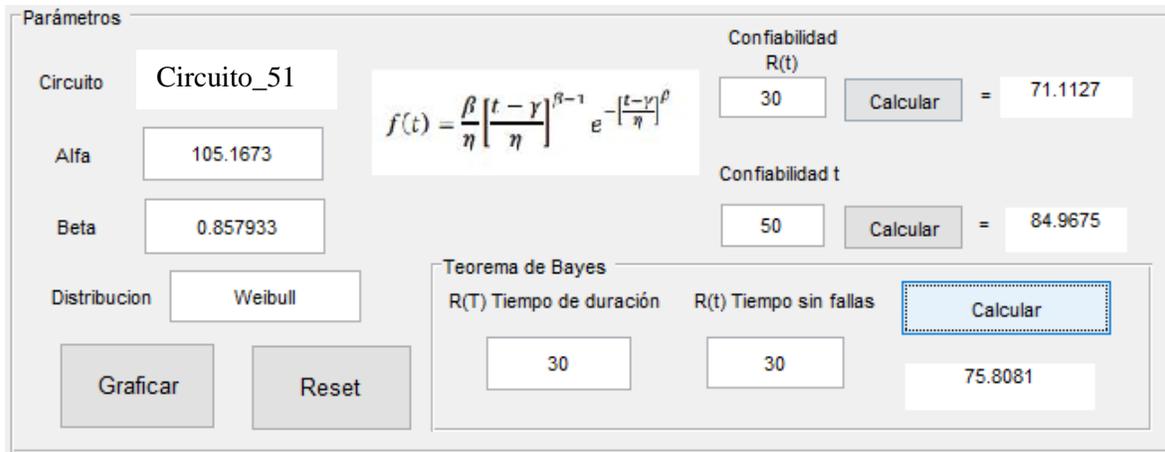


Figura 26. Aplicación de la interfaz, circuito_51.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 105,1673
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 0,8579
- ✓ Para un valor de tiempo de 30 días se tiene una confiabilidad de la operación de 71,112%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 85 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 30 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 75,80%.

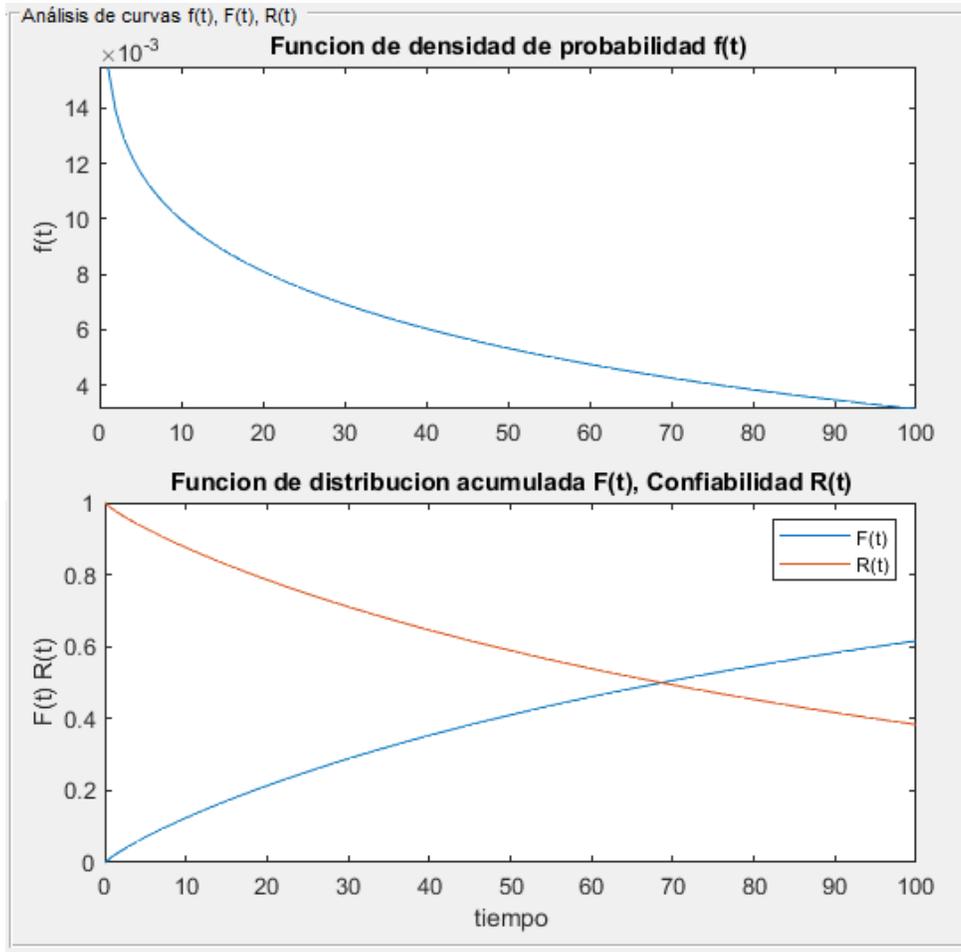


Figura 27. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_51.

En los anteriores casos se puede identificar que existe relación en el comportamiento de los circuitos a través de los años, el número de circuitos representados por la distribución normal es muy similar, así como los que son representados bajo la distribución Weibull.

Años	Distribución Normal				Distribución Weibull				Distribución Exponencial	Distribución Rayleigh
	$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\beta = 1$	$\beta = 2$
2015	14		38		55		37	4	1	
2016	13		34		60		41	4		
2017	8		41		53		48	3		
2018	11		57		39		36	3		1
Promedio	11,5		42,5		51,7		40,5	3,5	1	1

Tabla 12. Comparación entre años para las diferentes distribuciones.

Como se puede ver en la tabla 12, la distribución normal tiene el mismo comportamiento en cuanto a la cantidad de circuitos en las dos condiciones del parámetro beta (β), mientras que en la distribución Weibull existe una diferencia para el año 2018, se puede notar que la

cantidad de circuitos representados bajo esta distribución es baja en comparación con los años anteriores.

Caso 5.

Entrada de datos de los históricos de fallas consolidados desde el año 2015 al año 2018.

Distribución	Cantidad de circuitos	Parámetro β				Parámetro α			
		$\beta < 1$	$\beta = 1$	$1 < \beta < 4$	$\beta > 4$	$\alpha < 20$	$20 < \alpha < 40$	$40 < \alpha < 60$	$\alpha > 60$
Normal	13	4	-	9	-	1	1	2	9
Weibull	164	107	-	56	-	41	70	15	38
Gamma	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Exponencial	2	-	2	-	-	2	-	-	-
Rayleigh	1	-	-	1	-	1	-	-	-

Tabla 13. Resultados caso 5, consolidado de fallas.

- ✓ Para este caso se simularon 180 circuitos con sus respectivos datos de fallas consolidados para cada circuito durante estos cuatro años.
- ✓ La simulación muestra que 13 circuitos se pueden representar bajo una distribución normal, así mismo, 164 circuitos se representan bajo una distribución Weibull, 2 circuitos se representan bajo la distribución exponencial y 1 bajo la distribución Rayleigh.
- ✓ Para la distribución normal se puede ver que 4 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, los otros 9 circuitos se encuentran con valor de beta (β) entre 1 y 4.
- ✓ Para las distribuciones exponencial y Rayleigh el valor beta (β) toma los valores respectivos al ajuste, es decir, 1 y 2 respectivamente.
- ✓ Para la distribución Weibull se puede ver que 107 circuitos presentan un valor beta (β) menor que 1, 56 circuitos se encuentran con valor beta (β) entre 1 y 4.
- ✓ El parámetro alfa (α) indica la vida característica del circuito, es decir, se tiene una probabilidad del 63,2% que falle durante ese tiempo. Por lo cual, esto indica que 45 circuitos tienen la probabilidad de fallar dentro de 0 a 20 días, 71 circuitos dentro de 20 a 40 días, 17 circuitos dentro de 60 a 80 días y 47 circuitos después de 60 días.

Circuito	Distribución	Tamaño_ N	AlfaRL	BetaRL	AlfaMV	BetaMV	Error Alfa	Error Beta
Circuito_1	Weibull	85	12,53827	0,94334	12,80302	0,907814	2,07%	3,91%
Circuito_2	Weibull	69	16,40331	0,89594	16,71045	0,872040	1,84%	2,74%
Circuito_3	Weibull	8	94,75070	0,83971	93,55243	0,882902	1,28%	4,89%
Circuito_4	Weibull	26	36,13632	0,83562	35,56737	0,896248	1,60%	6,76%
Circuito_5	Weibull	14	85,74492	1,12027	86,18257	1	0,51%	3,39%
Circuito_6	Normal	52	65,56721	0,66845	61,21605	0,861241	7,11%	22,39%
Circuito_7	Weibull	40	30,56899	1,01278	30,48490	1	0,28%	2,07%
Circuito_8	Weibull	70	19,67545	1,02085	20,29076	0,911300	3,03%	12,02%

Tabla 14. Comparación entre métodos para el cálculo de parámetros α y β , consolidado de fallas.

- ✓ AlfaRL: Parámetro de alfa calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ AlfaMV: Parámetro de alfa calculado por el método de máxima verosimilitud.
- ✓ BetaRL: Parámetro de beta calculado por mínimos cuadrados de la función Weibull.
- ✓ BetaMV: Parámetro de beta calculado por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ Para los circuitos que son representados bajo la distribución de Weibull se encuentran similitudes con el parámetro alfa (α), por lo que para temas de análisis se escogen los resultados dados por el método de máxima verosimilitud.

- ✓ El error en el parámetro beta (β) para este caso comparado con los demás es bajo, presenta similitudes entre los dos métodos de estimación, esto quiere decir que entre mayor sean los datos ingresados al entorno mejor será la representación bajo la distribución Weibull. Se escoge el valor obtenido por el método de máxima verosimilitud.

Se muestran dos ejemplos tomados de la interfaz desarrollada:

✓ **Distribución Normal**

Figura 28. Aplicación de la interfaz, circuito_6.

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 61,21
- ✓ Parámetro beta (β) con valor de 0,8612
- ✓ Para un valor de tiempo de 45 días se tiene una confiabilidad de la operación de 100%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 49 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 30 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 92,10%.

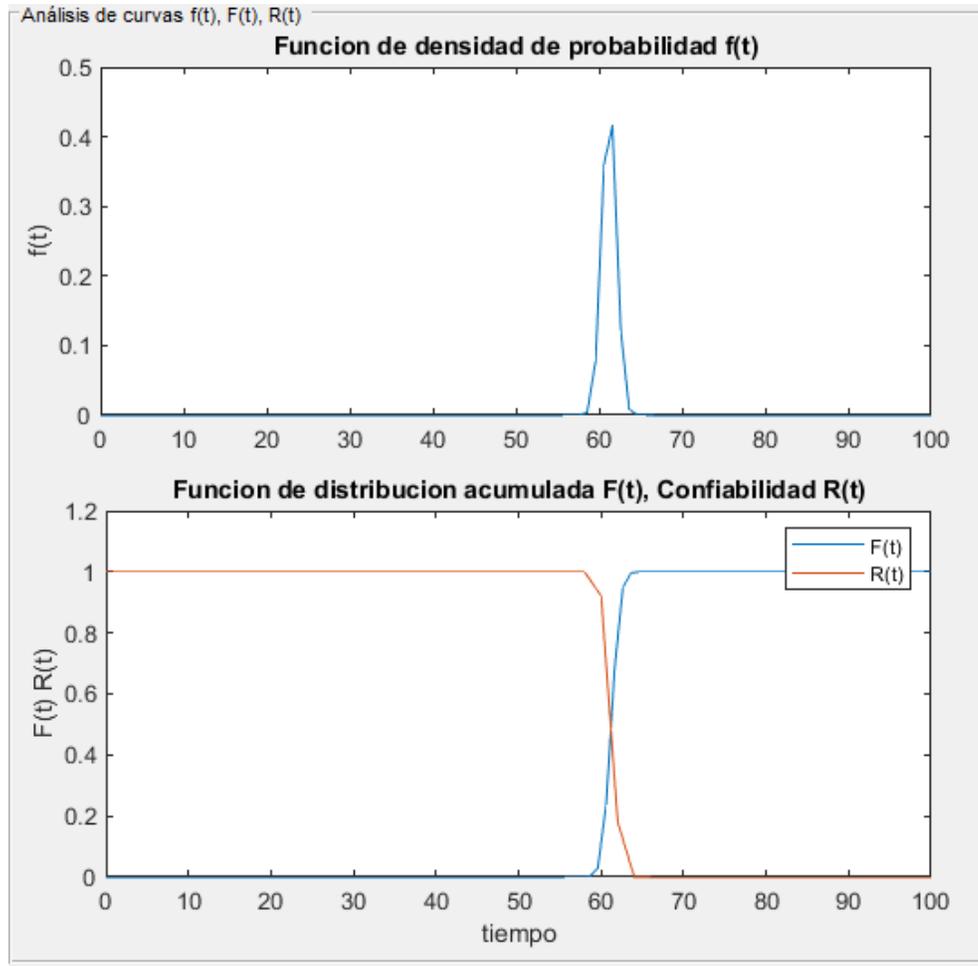


Figura 29. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_6.

- ✓ **Distribución Weibull**

Parámetros

Circuito: Circuito_43

Alfa: 64.883452

Beta: 1.137774

Distribucion: Weibull

Graficar Reset

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

Confiabilidad R(t): 45 Calcular = 51.7135

Confiabilidad t: 50 Calcular = 39.5279

Teorema de Bayes

R(T) Tiempo de duración: 35 R(t) Tiempo sin fallas: 30 Calcular 60.2546

Figura 30. Aplicación de la interfaz, circuito_43

- ✓ Parámetro alfa (α) con valor de 64,88
- ✓ Parámetro alfa (β) con valor de 1,1377
- ✓ Para un valor de tiempo de 45 días se tiene una confiabilidad de la operación de 51,7%.
- ✓ Para una confiabilidad del 50% se tiene una operación de 40 días.
- ✓ Si el circuito presenta una operación de 30 días sin presentar alguna falla, se requiere saber cuánto es la confiabilidad para una operación de otros 35 días sin fallar, para lo cual es resultado arrojado por la simulación para este caso fue de una confiabilidad de operación del 60,25%.

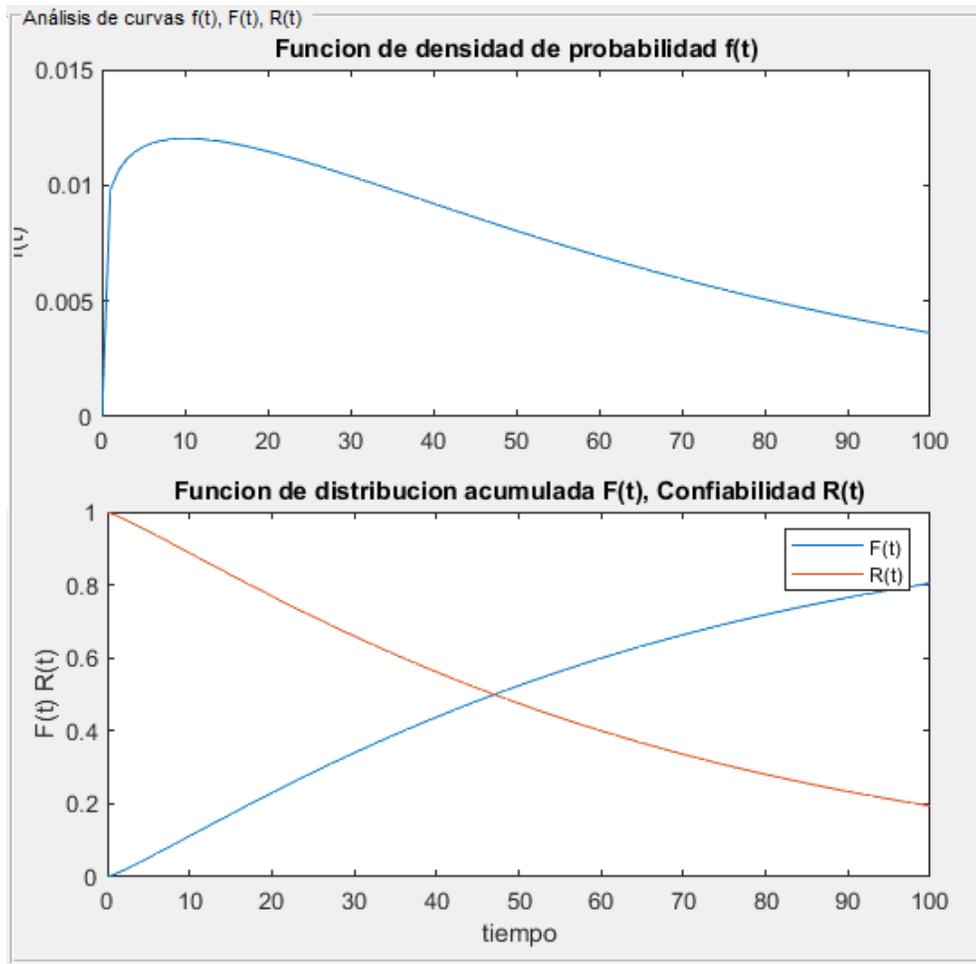


Figura 31. Curvas pdf, cdf y confiabilidad para el circuito_43.

Planes de mantenimiento a desarrollar.

Los resultados obtenidos anteriormente para cada caso, muestran la distribución de probabilidad que mejor los representa. Se evidencia que entre más datos e información se tenga de fallas, la distribución que mejor los representa es la distribución de Weibull. Por ese motivo los planes a desarrollar según la información obtenida en el caso 5, es la siguiente:

- ✓ Para los circuitos a los cuales el parámetro β sea menor que 1:

Este resultado indica que los circuitos se encuentran en la etapa 1 de la curva Davies (Figura1), es decir, los circuitos presentan fallas de arranque o fallas de mortalidad infantil.

En este período es recomendable hacer una fuerte inspección a los materiales a instalar, debido a que muchas fallas se deben a una mala producción, a una mala instalación de los equipos o a un bajo control de calidad. También, es recomendable revisar todas las

conexiones realizadas entre diferentes equipos y aún más importante si son de proveedores diferentes.

- ✓ Para los circuitos a los cuales el parámetro β sea igual a 1:

En este caso las fallas permanecen constantes, aparecen aleatoriamente y se presentan cuando los circuitos se encuentran en el período de vida útil, esto se debe a que la distribución que representa estos circuitos es la distribución exponencial. Sobre estos circuitos es recomendable hacer inspecciones constantes para evidenciar tipos de fallas como árboles, animales, estructuras, crucetas, pases MT. Otro tipo de fallas que pueden afectar estos circuitos pueden ser los transitorios, por lo cual es recomendable hacer seguimiento continuo y análisis térmico a las conexiones de las celdas o transformadores.

- ✓ Para los circuitos a los cuales el parámetro β este entre 1 y 4:

En este caso los circuitos se encuentran en el período de desgaste, en este caso es recomendable realizar un mantenimiento preventivo sobre el circuito, un reemplazo de piezas desgastadas con gran tiempo de uso. Además de realizar pruebas a los equipos para determinar el grado de deterioro. Para circuitos subterráneos, es recomendable realizar pruebas al cable con el fin de encontrar posibles fallas mediante descargas parciales si se cuenta con el material para cambio, ya que estas pruebas son destructivas, o mediante la técnica de ultrasonido con el fin de encontrar deterioro de empalmes o terminales. Así mismo, realizar termografía sobre los conductores aéreos en cada una de sus conexiones. Para este período suelen aparecer fallas por fatiga de elementos o corrosión de los materiales.

- ✓ Para los circuitos a los cuales el parámetro β sea mayor a 4:

Este período representa el envejecimiento acelerado de elementos, y se caracteriza por presentar fallas debido al sobre esfuerzo mecánico, térmico, eléctrico, se tiene una fuerte degradación de materiales, en específico en conectores, aisladores, estructuras, pararrayos y transformadores. Es recomendable realizar cambios a elementos que, aunque estén operativos ya hayan cumplido su tiempo de vida.

Predicción de fallas.

Se analizaron las fallas ocurridas en el mes de enero de 2019 en la unidad operativa, en este mes se tuvieron un total de 329 fallas. De estas 329 fallas aproximadamente el 50% pertenecen al sistema reparable, es decir, son fallas en redes de BT.

En este mes se presentaron fallas sobre 106 circuitos de la zona norte, analizando la información obtenida con la simulación del caso 5, se observa que 38 de estos circuitos estaban declarados como posibles circuitos a presentar una falla debido a que el MTTF para ellos se encuentra contenido en los 31 días del mes de enero.

A continuación, se presenta el listado de circuitos que coincidieron con las fallas presentadas en ese mes:

Circuito	Alfa	Beta	Distribución	MTTF
Circuito_2	16,7104553	0,87204051	Weibull	17,900195
Circuito_12	17,6870958	0,86490178	Weibull	19,039146
Circuito_25	15,5169284	0,8659229	Weibull	16,691282
Circuito_27	28,2023896	0,77833559	Weibull	32,607234
Circuito_31	21,4241314	0,93295246	Weibull	22,121339
Circuito_39	26,4753283	1,05012639	Weibull	25,965648
Circuito_70	14,3722206	1,08271515	Weibull	13,942071
Circuito_78	16,3053229	1,06861285	Weibull	15,890053
Circuito_101	5,64867395	2	Rayleigh	5,241421
Circuito_102	6,78850603	1	Exponencial	5,703962
Circuito_105	24,0377584	1,18519949	Weibull	22,685030
Circuito_107	14,9099077	1,04466617	Weibull	14,651519
Circuito_109	17,5558821	0,85212719	Weibull	19,070312
Circuito_115	25,059001	1,06802653	Weibull	24,425566
Circuito_121	18,5498323	0,98388273	Weibull	18,680361
Circuito_126	15,8453682	0,92251638	Weibull	16,454903
Circuito_135	15,9707696	0,89650496	Weibull	16,840134
Circuito_138	25,671144	0,87300081	Weibull	27,481073
Circuito_145	22,6771034	0,77458606	Weibull	26,315920
Circuito_147	8,63421769	1	Exponencial	8,572561
Circuito_148	22,0416783	1,00218678	Weibull	22,021388
Circuito_156	27,1107266	0,90274799	Weibull	28,478129
Circuito_157	28,2571253	0,94209975	Weibull	29,035874
Circuito_159	23,3275116	1,21508601	Weibull	21,873903
Circuito_160	28,028733	1,05195526	Weibull	27,471360
Circuito_177	24,6290522	0,99750172	Weibull	24,655195
Circuito_179	20,142912	0,97786987	Weibull	20,339908
Circuito_182	16,157154	0,93704423	Weibull	16,646558
Circuito_184	11,0597674	0,84414388	Weibull	12,084996
Circuito_186	29,3432498	0,87981804	Weibull	31,270227
Circuito_188	24,4303108	0,95782406	Weibull	24,904803
Circuito_190	24,6608564	0,88060218	Weibull	26,266858
Circuito_192	20,2209884	0,96941674	Weibull	20,499039
Circuito_197	15,7422756	0,9782062	Weibull	15,893790

Circuito	Alfa	Beta	Distribución	MTTF
Circuito_198	15,8754127	0,72671246	Weibull	19,416994
Circuito_199	22,3247011	1,01533451	Weibull	22,184243
Circuito_203	22,2800883	0,98341815	Weibull	22,441535
Circuito_204	27,1036341	0,83873893	Weibull	29,737918

Tabla 15. Circuitos que fallaron en el mes de enero 2019.

5 Conclusiones

Los entornos programados que permiten hallar la confiabilidad de los sistemas son piezas fundamentales en la operación de cualquier industria, debido a que no se tiene que invertir en complejos diseños que conlleven a pérdidas de tiempo y desviaciones de la operación. De esta forma, se logran establecer modelos en tiempo real que pronostican acertados y precisos comportamientos a futuro, no aplicados bajo hipótesis de comportamientos empíricos o por observaciones de la operación, que en muchos casos pueden ser valederos, pero no aseguran ni modelan verdaderamente el sistema. Estos entornos programados permiten un análisis adecuado de equipos, sistemas o procesos industriales de cualquier tipo.

Este tipo de procedimientos permiten analizar las fallas de los componentes, equipos y sistemas eléctricos con el objetivo de pronosticar los comportamientos, la planeación del mantenimiento y la operación, buscando facilitar la toma de decisiones para el manejo de activos. El desarrollo de estos programas permite ampliar el conocimiento en el campo del mantenimiento industrial, el cual es bastante complejo cuando se cuenta con un sistema robusto y de amplia información. Es por esto que la unidad operativa no solamente se encarga de ejecutar todos los trabajos diseñados y planeados para mejorar los indicadores de la compañía, sino que permite analizar la información, es allí donde se evidenció que los análisis que se estaban ejecutando presentaban un error en cuanto a la metodología que se estaba aplicando.

El modelo diseñado como mejora del proceso, depende principalmente de la información que se le suministra, que en este caso son los históricos de fallas de ciertos años, por tal motivo es importante realizar un análisis de la información debido a que se tiene una mala organización, datos incompletos y mal recolectados, es en estos casos que el modelo implementado podría dar información errónea del sistema al cual está representado. Por otra parte, el modelo implementado permite representar cada circuito bajo una distribución de probabilidad y a su vez comparar los resultados con la curva de Davies, esta información

permite tomar acciones correctivas y desarrollar planes de mantenimiento de acuerdo a la necesidad de cada circuito.

La metodología implementada permite determinar planes de mantenimiento para cada circuito según los parámetros que representen mejor los datos ingresados, para ello se propuso realizar inspecciones visuales, subterráneas y seguimientos periódicos a los circuitos, además de conocer diferentes causas que provocan las fallas y el desgaste de los materiales. Técnicas termográficas son necesarias para evidenciar el desgaste de los equipos, así como técnicas que no se aplican pero que asegurarían encontrar posibles puntos de fallas, como son el ultrasonido y las descargas parciales sobre los cables subterráneos y conductores aéreos.

Las curvas de densidad de probabilidad y de distribución acumulada permiten observar el comportamiento de los elementos en el tiempo, así se puede evidenciar la confiabilidad en la operación como la probabilidad falla en el transcurso de la operación.

El teorema de Bayes o vida residual ayuda a encontrar nuevos tiempos de operatividad de los equipos, ya que para tiempos de operación sin falla y sobrevivencia a períodos de mortalidad infantil la confiabilidad puede mejorar cuando la tasa de fallas disminuye.

El entorno programado permite entonces determinar la confiabilidad de cada circuito, es por esto que se hace necesario realizar un seguimiento al comportamiento de la distribución de cada circuito a través de los años, para determinar si los mantenimientos realizados han logrado aumentar la eficiencia y disminuir la cantidad de fallas, además de servir como pronóstico para determinar si se realizan mantenimientos programados o se espera hasta la falla es decir, mantenimiento correctivo, o por otro lado realizar lo que se llama reacondicionamiento forzado o conveniente, inspecciones no destructivas versus reemplazo de partes, acciones correctivas versus no hacer nada o disminuir los tiempos entre reparaciones y aumentar los intervalos de reemplazo óptimos.

Anexos.

Código principal para el entorno programado en el diseño de la metodología descrita en la figura 9.

```
clc
close all
clear all

% ==, ~=, <, >, <=, >=
data = importYearXLS (2016);
% data = importfile ('CONSOLIDADO','Hoja1');
Circuito = data.CircuitoOrigen;
Circuitos = cellfun('isempty',Circuito);
Circuito(Circuitos) = [];
Tiempo = data.TIEMPO_FALLA;
Tiempo = Tiempo(~isnan(Tiempo));
M = table (Circuito, Tiempo);

sortM = sortrows(M);
sortM = table2cell(sortM);
[fila, columna] = size(sortM);

soloCircuito = unique(sortM(:,1));
% soloCircuito = table2cell(soloCircuito);
[rwA, colA] = size(soloCircuito);

matT = zeros(rwA,1000); % Matriz que va a guardar todos los datos de
Tiempo.

for n=1:rwA
    flag = 1;
    Ta = 1;
    j = 1;
    k = 0;
    tempNombre = soloCircuito(n,1);
    vector = zeros(1,4);

    while(flag==1)
        index = cellfun(@strcmp, tempNombre, sortM(Ta,1));
        if(index == 1)
            vector(j) = sortM{Ta,2}; % Dato de tiempo que corresponde al
cirtuito que se esta comparando.
            j = j+1;
        else
            k = k+1;
        end

        Ta = Ta+1;
        if(k>=fila || Ta>fila)
            flag = 0;
        end
    end
    lenVector = length(vector);
```

```

matT(n,1:lenVector) = vector;

end

% NOTA:
% Todos los datos de tiempo quedaron guardados en la matriz matT.
% Cada circuito es una fila y los datos de tiempo estan en las columnas
de
% esa fila.

ResultMV = zeros (rwA,2);
ResultRL = zeros (rwA,2);
Mtriz = zeros (rwA,6);
Mtriz_dist = strings (rwA,1);
Mtriz_pValue = zeros (rwA,1);
Mtriz_distWEI = strings (rwA,1);
Mtriz_pValueWEI = zeros (rwA,1);
Ajus = strings (rwA,1);
Mtriz_CompA = zeros (rwA,1);
Mtriz_CompAl = zeros (rwA,1);
Mtriz_PGamma = zeros (rwA,1);
ResultMVajus = zeros (rwA,2);
ResultGm = zeros (rwA,2);
Varianza = zeros (rwA,1);
Esperanza = zeros (rwA,1);
MTTF = zeros (rwA,1);

for i=1:rwA

    tiempo = matT(i,:); % Sacar todos los valores de tiempo de la primera
fila (primer circuito).
    tiempo = tiempo(find(tiempo)); % elimina zeros.
    tiempo = tiempo(~isnan(tiempo)); % elimina los NaN.

    [VF, VC] = size (tiempo);
    Orden = 1:1:VC;
    Fun = tiempo';
    Ord = Orden';

    WEI = [Ord Fun];

    %Rango de la mediana

    Ta = size(WEI,1);
    x = 1;
    v = 0.0611; %Parametro de ajuste
    Ks = zeros(Ta,1);
    xx = 1;

    while xx <= Ta
        y = WEI(xx,2);
        Ks(xx,1)= y;
        KS = sort((Ks(:))); %Ordena de menor a mayor
        xx = xx + 1;
    end
end

```

```

end

% Linealización y regresión para datos alfa y beta

G=zeros(Ta,1);
G1=zeros(Ta,1);
G2=zeros(Ta,1);

while x <= Ta
    Rx = ((x - 0.3)/(Ta + 0.4));
    G(x,1)=Rx;
    M = log (abs(KS(x,1)-v));
    G1(x,1)=M;
    yi = log(log(1/(1-Rx)));
    G2(x,1)=yi;
    x = x+1;
end

plot (G1,G2, '.');
c = polyfit(G1,G2,1);
c1 = G1(1):0.1:G1(length(G1));
c2 = polyval(c,c1);

%plot(c1,c2);
%hold on
%plot(G1,G2, 'x');
%xlabel('x')
%ylabel('y')

%Parámetros por Máxima Verosimilitud
parmhat = wblfit(Fun);
AlfaMV = parmhat (1,1);
BetaMV = parmhat (1,2);

[M,V] = wblstat(AlfaMV,BetaMV);

AlfaMV; % Parámetro con MV
BetaMV; % Parámetro con MV
M; % Media
V; %Varianza
ResultMV (i,:) = parmhat;

% Parámetros por linealización y regresión
Beta = c(1,1);
Intercepto = c(1,2);
Alfa = exp(-(Intercepto/Beta));
Aprox = 0;
ResultRL (i,:) = [Alfa Beta];

%% Pruebas test de normalidad:
% H0: Datos provienen de distribución normal.
% h = 0; Acepta hipótesis nula.
% h = 1; Rechaza hipótesis nula.

```

```

if Ta >= 2
    [h_ks, p_ks] = kstest(tiempo);
else
    h_ks = 1;
    p_ks = 1;
end

if Ta >= 4
    [h_ad, p_ad] = adtest(tiempo);

else
    h_ad = 1;
    p_ad = 1;
end

[h_chi, p_chi] = chi2gof(tiempo);

vech = [h_ks h_ad h_chi];
tablaVerdad = [0 0 0; 0 0 1; 0 1 0; 1 0 0];

if(isequal(vech,tabelaVerdad(1,:)))
    dist = 'Normal';
    pValue = min(vech);
elseif(isequal(vech,tabelaVerdad(2,:)))
    dist = 'Normal';
    pValue = min(vech);
elseif(isequal(vech,tabelaVerdad(3,:)))
    dist = 'Normal';
    pValue = min(vech);
elseif(isequal(vech,tabelaVerdad(4,:)))
    dist = 'Normal';
    pValue = min(vech);
else
    dist = 'No_Normal';
    pValue = min(vech);
end

Mtriz_dist(i,1) = dist; % Guarda resultado de test de normalidad
Mtriz_pValue(i,1) = pValue; % Guarda resultado de valor P de
significancia.

%% Pruebas test de WEIBULL:
% H0: Datos provienen de distribución weibull.
% h = 0; Acepta hipótesis nula.
% h = 1; Rechaza hipótesis nula.

if Ta >= 2
    test_cdf = makedist ('weibull','a',AlfaMV,'b',BetaMV);
    [h_ks1, p_ks1] = kstest(tiempo,'CDF',test_cdf);
else
    h_ks1 = 1;
    p_ks1 = 1;
end

```

```

if Ta >= 4
    [h_ad1, p_ad1] = adtest(tiempo, 'Distribution', 'weibull');
else
    h_ad1 = 1;
    p_ad1 = 1;
end

if Ta > 1
    PD = fitdist (Fun, 'weibull');
    [h_chil, p_chil] = chi2gof(tiempo, 'CDF', PD);

else
    h_chil = 1;
    p_chil = 1;
end

vech = [h_ks1 h_ad1 h_chil];
tablaVerdad = [0 0 0; 0 0 1; 0 1 0; 1 0 0];

if(isequal(vech, tablaVerdad(1, :)))
    dist = 'Weibull';
    pValue = min(vech);
elseif(isequal(vech, tablaVerdad(2, :)))
    dist = 'Weibull';
    pValue = min(vech);
elseif(isequal(vech, tablaVerdad(3, :)))
    dist = 'Weibull';
    pValue = min(vech);
elseif(isequal(vech, tablaVerdad(4, :)))
    dist = 'Weibull';
    pValue = min(vech);
else
    dist = 'No_Weibull';
    pValue = min(vech);
end

Mtriz_distWEI(i,1) = dist; % Guarda resultado de test de weibull
Mtriz_pValueWEI(i,1) = pValue; % Guarda resultado de valor P de
significancia.

%% Ajuste de parametros

Test = Mtriz_dist (i,1);
No = 'Normal';
Compa = strcmp (Test, No);
Mtriz_Compa (i,1) = Compa;

Test1 = Mtriz_distWEI (i,1);
Wb11 = 'Weibull';
Comp1 = strcmp (Test1, Wb11);
Mtriz_Comp1 (i,1) = Comp1;

if Mtriz_Compa (i,1) == 1
    Ajus (i,1) = No;

```

```

ResultMV (i,:) = [AlfaMV BetaMV];
Med = median (tiempo);
Desviac = std (tiempo);
Esperanza (i,1) = Med;
Varianza (i,1) = Desviac;
ValorFG = (1/BetaMV) + 1;
y = @(t) exp(-t).*(t.^(ValorFG - 1));
F_gamma = integral(y,0,inf);
MTTF (i,1) = AlfaMV * F_gamma;
else
if Mtriz_Compal (i,1) == 1
Ajus (i,1) = Wbll;
ResultMV (i,:) = [AlfaMV BetaMV];
ValorFG = (1/BetaMV) + 1;
y = @(t) exp(-t).*(t.^(ValorFG - 1));
F_gamma = integral(y,0,inf);
% Esperanza (i,1) = M;
% Varianza (i,1) = V;
Esperanza (i,1) = F_gamma * (AlfaMV^(-1/BetaMV));
Varianza (i,1) = (AlfaMV^(-2/BetaMV))*(F_gamma-
(F_gamma*F_gamma));
MTTF (i,1) = AlfaMV * F_gamma;
else
Ajus (i,1) = Ta;

if Ta <= 2
Ajus (i,1) = 'No_Existen_suf_Datos';

else
if ResultMV (i,2) <= 1.95
Ajus (i,1) = 'Gamma';
Gamm = gamfit (Ks);
BetaMV = Gamm (1,1);
AlfaMV = Gamm (1,2);
ResultMV (i,:) = [AlfaMV BetaMV];
Varianza (i,1) = AlfaMV * BetaMV;
Esperanza (i,1) = AlfaMV * (BetaMV * BetaMV);
MTTF (i,1) = AlfaMV * (BetaMV * BetaMV);
ResultMVajus (i,:) = parmhat;
ResultGm (i,:) = Gamm;

%Test de Ajuste
test_KsAjus = makedist
('Gamma','a',AlfaMV,'b',BetaMV);
[h_ks2, p_ks2] = kstest(tiempo,'CDF',test_KsAjus);

test_AdAjus = makedist
('Gamma','a',AlfaMV,'b',BetaMV);
[h_ad2, p_ad2] =
adtest(tiempo,'Distribution',test_AdAjus);

PD_Ajus = fitdist (Fun, 'Gamma');
[h_chi2, p_chi2] = chi2gof(tiempo,'CDF',PD_Ajus);

vech = [h_ks2 h_ad2 h_chi2];

```

```

tablaVerdad = [0 0 0; 0 0 1; 0 1 0; 1 0 0];

if(isequal(vch,tablaVerdad(1,:)))
    dist = 'Gamma';
    pValue = min(vch);
elseif(isequal(vch,tablaVerdad(2,:)))
    dist = 'Gamma';
    pValue = min(vch);
elseif(isequal(vch,tablaVerdad(3,:)))
    dist = 'Gamma';
    pValue = min(vch);
elseif(isequal(vch,tablaVerdad(4,:)))
    dist = 'Gamma';
    pValue = min(vch);
else
    dist = 'No_Gamma';
    pValue = min(vch);
end

Ajus(i,1) = dist; % Guarda resultado de test Gamma.
Mtriz_PGamma(i,1) = pValue; % Guarda resultado de
valor P de significancia.

if Ajus(i,1) == 'No_Gamma';
    ResultMV (i,:) = ResultMVajus (i,:);

    if ResultMV (i,2) <= 1.05
        ResultMV(i,2) = 1;
        Ajus(i,1) = 'Exponencial';
        MTTF (i,1) = AlfaMV;
        Esperanza (i,1) = 1/AlfaMV;
        Varianza (i,1) = 1/(AlfaMV*AlfaMV);

    else
        Ajus (i,1) = 'Rayleigh';
        ResultMV (i,:) = [AlfaMV BetaMV];
        ResultMV (i,2) = 2;
        ValorFG = (1/BetaMV) + 1;
        y = @(t) exp(-t).*(t.^(ValorFG - 1));
        F_gamma = integral(y,0,inf);
        MTTF (i,1) = AlfaMV * F_gamma;
        Esperanza (i,1) = F_gamma * (AlfaMV^(-
1/BetaMV));
        Varianza (i,1) = (AlfaMV^(-
2/BetaMV)) * (F_gamma - (F_gamma*F_gamma));
    end
end
else
Ajus (i,1) = No;
Med = median (tiempo);
Desviac = std (tiempo);
ResultMV (i,:) = [AlfaMV BetaMV];
Esperanza (i,1) = Med;
Varianza (i,1) = Desviac;
ValorFG = (1/BetaMV) + 1;

```

```

        y = @(t) exp(-t).*(t.^(ValorFG - 1));
        F_gamma = integral(y,0,inf);
        MTTF (i,1) = AlfaMV * F_gamma;

        Ajus (i,1) = No; % Guarda resultado de test de
normalidad

                                end
                            end
                        end
                    end
                end

Mtriz1 = array2table (Mtriz);
Mtriz1 = table (soloCircuito, ResultMV, Ajus, Esperanza, Varianza, MTTF);

```

Bibliografía

- [1] ENEL CODENSA S.A ESP, "ENEL CODENSA S.A ESP," Grupo empresarial ENEL, 2005. [Online]. Available: <http://corporativo.codensa.com.co/es/conocenos/Paginas/nuestrahistoria.aspx>. [Accessed 20 07 2018].
- [2] E. P. Nacional, "Mejoramiento de índices de confiabilidad mediante la optimización de recursos en redes de distribución," XIX Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2005, p. 230.
- [3] S. R. Castaño, *Análisis de datos de falla*, Manizales: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales , 2014.
- [4] J. C. B. Ceballos, *Algoritmo para la localización de fallas en sistemas de distribución usando máquinas de soporte vectorial*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [5] L. M. M. O. Andres Felipe Castaño, *Desarrollo de un entorno programado para el análisis de confiabilidad con base en distribución Weibull biparamétrica*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
- [6] E. E. Blanco, *Distribuciones no tradicionales para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), que se ajustan a varias fases de la curva de Davies*, Medellín, Antioquía : Universidad EAFIT, Escuela de ingeniería, Departamento de ingeniería mecánica, 2014.
- [7] F. B. C. E. R. I. M. Badan, "Integrated System for Realiability - Modeling of Cold Plastic Deformation Tools Used in Car Industry.," *University of Oradea. IEEE, Proceedings anual reliability and maintainability, Symposium*, pp. 212 - 216, 2002.
- [8] G. K. Y. J. Park Won, "Goodness of Fit Test for the Power-Law Process," *IEEE, Transactions on reliability* , vol. Vol. 41, no. No 1, 1992.
- [9] A. R. A. E. F. H. F. P. S. Raquel Salazar Moreno, *Aplicaciones de la distribucion Weibull en ingeniería de confiabilidad*, Mexico-Textcoco, Chapingo : Universidad Autónoma de Chapingo .
- [10] C. d. R. d. E. y. Gas, *RESOLUCIÓN CREG 024*, CREG , 2005.
- [11] W. S. Carrera, *Modelo de dimensionamiento de cuadrillas para la atención de fallas en el sistema de distribución de CODENSA S.A ESP*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [12] C. d. R. d. E. y. Gas, *RESOLUCIÓN CREG 015*, CREG, 2018.
- [13] R. Glossary. [Online]. Available: http://www.weibull.com/knowledge/rel_glossary.htm. [Accessed 25 03 2019].

- [14] M. S. G. Rueda, *Estudios de los procesos homogéneos y no homogéneos asociados al comportamiento de la confiabilidad en los sistemas reparables*, Medellín : Universidad EAFIT, Escuela de ingenierías , 2007.
- [15] T. Gonen, *Electric power distribution system engineering*, California State University : McGraw Hill.
- [16] S. R. Castaño, *Confiabilidad de sistemas de distribución*, Manizales: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- [17] G. L. G. Monsave, *Introducción a la teoría de la confiabilidad y su aplicación en el diseño y mantenimiento de equipos industriales de un proceso de renovación*, Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Escuela de ingeniería Eléctrica y Mecánica, 2006.
- [18] E. R. López, *Estudio de mejora del mantenimiento mediante la aplicación de la distribución de Weibull a un histórico de fallos.*, Fundación UNED, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2012.
- [19] L. Torres, *Gestión integral de activos físicos y mantenimiento*, Alfaomega, ISBN 9789587781175.
- [20] L. A. Mora G, *Mantenimiento Estratégico para Empresas Industriales o de Servicio.*, Medellín, Colombia : Editorial AMG, ISBN 958-33-8218-3, 2006.