

Análisis de fiabilidad aplicado a interruptores de potencia en subestaciones eléctricas

Reliability analysis applied to circuit breakers in electric substations

Brian Manuel González Contreras¹, José Víctor Galaviz Rodríguez²

¹ Doctor, Maestro en Ciencias, Ingeniero, Universidad Autónoma de Tlaxcala Calle del Bosque S/N, Tlaxcala Centro, C.P. 90000, Tlaxcala, Tlaxcala, México. pbd@brianmgc.i8.com

² Doctorado en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología, Universidad Tecnológica de Tlaxcala, El Carmen Xalpatlabuaya S/N, C.P. 90500 Huamantla, Tlaxcala, México. galaviz_4@hotmail.com

Fecha de recepción: 15/06/2016 Fecha de aceptación del artículo: 05/12/2016

Resumen

El análisis de fallos y la seguridad industrial que se presentan en los procesos industriales de la planta se rigen a través de los sistemas probabilísticos tales como el modelado de Weibull. Este tipo de aplicaciones usando probabilidad y estadística son propias de la Ingeniería de Fiabilidad. Esta disciplina contempla múltiples técnicas predictivas que son fundamentales para el mantenimiento de los equipos. El análisis predictivo de Weibull implica una serie de modelos estocásticos exponenciales y normales que conllevan una solución analítica basada en técnicas de probabilidad y estadística. Es por lo anterior que, en planta, se utiliza un método más rápido y sencillo conocido como modelo gráfico de Weibull. En esta investigación, se hace uso de este modelo para establecer la confiabilidad, la vida media y la desviación típica de los fallos de un grupo de interruptores de potencia utilizados en la compañía de suministro eléctrico en Apizaco, Tlaxcala, México.

Palabras clave

Fiabilidad, confiabilidad, distribución de probabilidad, modelo de Weibull, interruptores de potencia, servicio eléctrico.

Abstract

Failure analysis and industrial safety presented in industrial processes are defined through probabilistic systems such as Weibull modeling. This practice relies on the domain of the fiability engineering,

where many predictive techniques are considered in order to establish correct maintenance of industry's equipment. The predictive Weibull analysis considers exponential stochastic and normal model series leading to analytical solutions based on statistics and probability techniques. However, in plant, a graphical method is preferable due to fast and easy implementation, known as Weibull plot. In this paper, the Weibull plot is employed in order to establish the dependability, average and deviation for a group of power circuit breakers used by the generation and delivery electric power company in Apizaco, Tlaxcala, México.

Keywords

Reliability, dependability, probability distribution, Weibull distribution, circuit breaker, electric service

3. Introducción

La energía eléctrica es indispensable para muchos aspectos de la vida cotidiana, ninguna persona es ajena al consumo de la energía eléctrica, ya sea en la casa, en la industria, en los hospitales, etc., todos hacemos uso de esta. Para evitar pérdidas de tensión (voltaje) debidas a la transmisión a grandes distancias, las tensiones que se manejan son del orden de 72, 145, 240 y 420 kV [1]. Estos voltajes no son posibles de emplearlos en instalaciones de industrias, comercios y residencias, de aquí que se tenga la necesidad de reducir dichas tensiones a otras de menor valor. Es por esta razón que se emplean subestaciones eléctricas que tienen la finalidad de

transformar las tensiones de transmisión a valores de sub-transmisión, para posteriormente limitarla a valores nominales de 127 V doméstico y 220 ó 440 V industrial [1, 2].

En México, la compañía suministradora de energía eléctrica se divide en tres estructuras principales: generación, transmisión y distribución. La actividad de distribución de la energía está organizada en 16 Gerencias Divisionales de Distribución (divididas a su vez en un número variable de superintendencias de Zona) en donde se ubican subestaciones eléctricas que se encargan de las actividades antes mencionadas [3]. Sin embargo, cada división e incluso zonas, tienen diferentes protocolos de mantenimiento de los equipos eléctricos que integran a cada subestación eléctrica, por lo que en cada una de ellas se tienen problemas propios. En específico de la zona de Tlaxcala (ubicada en la división centro oriente), se considera en este trabajo el caso de los interruptores de potencia en vacío que son utilizados ampliamente en tensiones de media tensión (15 kV a 38 kV) [4], para lo cual, a partir de datos proporcionados por esta compañía de una muestra representativa de los mismos, se realiza un estudio sobre fiabilidad. Los resultados obtenidos permiten proponer estrategias de mantenimiento para los interruptores de potencia considerando un modelo probabilístico adecuado para el tipo de equipo analizado, la finalidad es coadyuvar en la definición de directivas en pro de un mantenimiento basado en fiabilidad.

2. El servicio eléctrico

El contexto en que se desarrolla el presente trabajo considera el servicio eléctrico como aquella entrega de energía eléctrica hacia un usuario. Se asume que los componentes de la compañía suministradora que permiten lograr la entrega de este servicio son denominados sistemas, los cuales incluyen uno o varios equipos o procesos. El equipo de interés en este trabajo es el interruptor de potencia

2.1. Subestaciones eléctricas

El contexto en que se desarrolla el presente trabajo (una subestación eléctrica), es un arreglo de componentes eléctricos que incluyen barras, transformadores de potencia, interruptores, cuchillas

desconectoras, auxiliares, etc. [2-4]. Las subestaciones pueden encontrarse en las instalaciones eléctricas elevadoras, en las redes de sub-transmisión y transmisión y en las instalaciones de los consumidores. Las subestaciones eléctricas presentan arreglos y componentes similares, estos dispositivos permiten cambiar las características de la energía eléctrica tales como tensión, corriente y frecuencia. Entre las partes que integran a una subestación eléctrica se encuentran [1, 2]:

1. Transformador de potencia
2. Transformadores de instrumentos
3. Transformadores de potencial
4. Transformadores de corriente
5. Capacitores
6. Apartarrayos
7. Interruptores de potencia
8. Cuchillas
9. Reactores
10. Bancos de baterías
11. Cargadores de baterías

2.2. Los interruptores de potencia

Según la norma IEEE C37.100-1992 [5], un interruptor de potencia es aquel “dispositivo mecánico de interrupción capaz de unir, conducir e interrumpir corrientes bajo condiciones normales del circuito; también unir, conducir e interrumpir, para un tiempo específico y de interrupción, corrientes bajo condiciones específicas anormales del circuito, tal como un corto-circuito”. La función principal es desconectar alguna parte del sistema eléctrico, ya sea en modo de operación normal o en estado de corto. En la práctica, un interruptor puede ser accionado de forma manual o a través de una señal de algún relevador. Para obtener una mayor confiabilidad de estos circuitos de control, se les conecta a bancos de baterías, aun cuando estas instalaciones aumentan el costo y el mantenimiento exigido por estos equipos. Pueden utilizarse en protección de primarios en transformadores, así como en protección de línea y conmutación. Se clasifican de acuerdo al medio de interrupción usado para enfriar y elongar el arco eléctrico durante la interrupción; entre los tipos de interruptores de potencia más comunes se tienen [1, 2]:

1. Interruptores en aceite: pequeño y gran volumen.

2. Interruptores en aire magnético.
3. Interruptores en gas hexafluoruro de azufre (SF₆).
4. Interruptores neumáticos.
5. Interruptores en vacío.

Debido a que en este trabajo se consideran los interruptores de potencia en vacío, solamente se presentan sus características.

2.3. Los interruptores en vacío

Estos equipos se diseñan para operar en medios de hasta 38 kV como tensión máxima y debido al pequeño tamaño de los interruptores permite instalaciones verticales fijas logrando ahorros de espacio [1, 2]. Algunas de sus ventajas son:

1. Tiempo de operación muy rápida.
2. Rigidez dieléctrica se restablece rápido.
3. Son menos pesados y más baratos.
4. Una vida útil mucho mayor (hasta 30 años).
5. Especiales para sistemas en baja y mediana tensión.

Entre las desventajas pueden mencionarse:

1. Dificultad para mantener el vacío.
2. Generan sobretensiones.
3. Capacidad de interrupción limitada.

El agente que permite la extinción del arco es el vacío. Las cámaras (cilindros) al vacío se fabrican bajo las más estrictas normas de seguridad, limpieza y calidad. En estos equipos, parte del mecanismo de transmisión se encuentra en un tanque muerto de material antimagnético y lleno de gas SF₆. Este tipo de depósitos no son considerados como recipientes a presión ya que la presión del gas SF₆ es baja con relación al volumen requerido. Un interruptor de potencia se constituye por:

1. Tanque muerto
2. Cámara de vacío
3. Parte de la transmisión
4. Boquillas con barra conductora
5. Transformadores de corriente
6. Aisladores

Cuando se utilizan a la intemperie, el cilindro de

vacío queda inmerso en una cabina metálica o en un tanque sellado lleno de aceite. Este tipo de interruptores son los más usados en instalaciones relativamente recientes para sustituir interruptores en aire y aceite, pues son pequeños y proporcionan espacio para expansión futura de la planta., además de que se adaptan muy bien para protección de sobrecarga. Son ampliamente utilizados en tensiones de media tensión (15 kV a 38 kV) ubicados a la intemperie en sistemas de distribución [3, 4].

3. Confiabilidad de sistemas/equipos

La confiabilidad de un sistema o equipo se enfoca en las características del servicio proporcionado por él para que sea justificablemente de confianza, pues del servicio que se entrega depende el usuario para la consecución de una actividad o función. Esta confianza incluye que el servicio sea seguro también. Para lograr esto en un sistema o equipo, éstos deben tener ciertos atributos [6-8].

3.1. Atributos

El aseguramiento de la confiabilidad de un sistema o equipo requiere tener valores adecuados de cantidades medibles denominadas atributos: fiabilidad, disponibilidad y preservabilidad. Se trata de valores cuantitativos probabilísticos en donde se toma como la variable aleatoria al tiempo de falla t_f siendo $t = 0$ el tiempo de puesta en marcha del equipo. Se define la función acumulativa de probabilidad $F(t)$, como la probabilidad de que un equipo falle. Está dada por:

$$F(t) = \Pr(t_f) \leq t \quad (1)$$

Así mismo, la función de densidad (distribución) de probabilidad $f(t)$ que establece la densidad de falla, puede obtenerse como la derivada de (1):

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (2)$$

3.1.1. Fiabilidad

Habilidad/propiedad de un sistema para realizar su función solicitada bajo ciertas condiciones, dentro de un alcance dado, durante un tiempo específico. Es un valor probabilístico, pues se expresa como probabilidad de que un sistema proporcione el

servicio correcto (sin falla) en un tiempo $t > 0$, siempre que el servicio correcto se haya dado en $t = 0$. Matemáticamente y tomando en cuenta (1) se trata de una función de fiabilidad o de sobrevivencia definida como:

$$R(t) = 1 - F(t) = \Pr(t_f > t) \quad (3)$$

La fiabilidad puede medirse a través de dos formas según la situación o datos disponibles: puede ser usando el MTTF, o la tasa de fallo. La tasa de riesgo o tasa de fallo relaciona el número de fallos por intervalo de tiempo respecto a los elementos que aun sirven, expresada en términos de (1) y (3):

$$\lambda(t) = \frac{f_t}{R_t} \quad (4)$$

El tiempo esperado para que un sistema falle es llamado el tiempo promedio de falla (MTTF, por sus siglas en inglés) y expresa la vida de un equipo, se expresa por (5):

$$MTTF(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5)$$

Donde es importante indicar que este valor se emplea para sistemas o equipos nuevos, pero que para el caso de quipos reparables se cuenta con tiempo promedio entre fallos (MTBF, por sus siglas en inglés) y que es el considerado en este trabajo.

3.1.2. Preservabilidad

Es la probabilidad de ser capaz de reparar el sistema, en otras palabras, la habilidad del equipo/sistema para ser mantenido. Incluye las diferentes funciones o actividades necesarias para mantener o restaurar un sistema a un estado aceptable u operacional. Supone la probabilidad de entrega del servicio en $t > 0$, siempre que éste no se haya entregado en $t=0$ por estar bajo un proceso de reparación. Un valor alto de preservabilidad quiere decir un bajo tiempo muerto de operación del sistema. Puede medirse a través del tiempo promedio de reparación o recuperación (MTTR en inglés), el cual es también un valor probabilístico.

3.1.3. Disponibilidad

Es la probabilidad de encontrar el sistema en su estado operacional en algún tiempo en cualquier momento. Es un valor que es de mayor importancia para el usuario del sistema. Se calcula a través de (5):

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (6)$$

3.2. Mantenimiento

El mantenimiento es conocido en el área de ingeniería de forma extendida como “reparar cosas rotas” por lo que es reactiva a las averías. Sin embargo, la perspectiva industrial tiene dos visiones del mantenimiento. El mantenimiento es clave para preservar el desempeño del equipo para así lograr la confiabilidad de los sistemas, es decir, lograr buenos valores de los atributos. De hecho, los medios que garantizan la confiabilidad están basados en el mantenimiento. Las normas industriales más reconocidas a nivel internacional como, por ejemplo, IEEE [5], IEC [9] y NEC [10], tienen una definición común de mantenimiento: *todas aquellas acciones que i) controlen el proceso del deterioro que lleve a una falla/fallo o ii) restauren el elemento/sistema a su estado operacional después de una falla/fallo*. Por un lado, puede enfocarse de forma organizacional de manera que todos los integrantes de la misma sean proactivos en tareas de mantenimiento, es decir, está focalizada en los empleados. En este caso se habla de mantenimiento productivo total (TPM- *total productive maintenance*) en donde el personal operativo realiza inspecciones periódicas y de servicio al equipo, mientras que el departamento de mantenimiento realiza las valuaciones y reparaciones mayores [7]. Por otro lado, se tiene el mantenimiento centrado en los sistemas o equipos a través de planear o diseñar el plan de mantenimiento considerando las condiciones de la planta. En lo sucesivo, este trabajo se centra en el mantenimiento enfocado en los sistemas o equipos.

Los protocolos de mantenimiento enfocados en los sistemas o equipos utilizados por las organizaciones pueden clasificarse en 2 grupos principales (obsérvese la Figura 1): *las actividades planeadas* y *las actividades no planeadas* [6, 8].

El interés ideal de todas las organizaciones es establecer una planeación que evite la aparición de las fallas, sin embargo, estadísticamente hasta el 2014, aún el 55% del mantenimiento es *no planeado* [8]. En este caso, las actividades de mantenimiento se refieren a acciones correctivas que tienen por objetivos reemplazar componentes que fallaron una

vez que se ha suscitado la avería. El mantenimiento no planeado es relativamente barato porque los gastos de reemplazo se ejecutan sólo en el momento de la falla, sin embargo, por sí sólo no garantiza confiabilidad ni seguridad.



Figura 1. Tipos de mantenimiento para sistemas/equipos

Por otro lado, el *mantenimiento planeado* incluye el mantenimiento de tipo sistemático y de tipo condicional [7, 8]. Las Figuras 2 y 3 muestran los dos tipos. Se asume que un sistema/equipo tiene entradas (solicitudes o demandas), denotadas $u(t)$, y salidas (el servicio entregado), denotadas por $y(t)$.

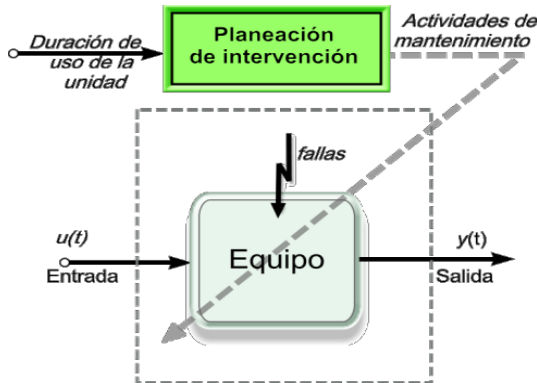


Figura 2. Tipos de mantenimiento para sistemas/equipos

El *mantenimiento sistemático* (ver Figura 2) se establece en intervalos de tiempo dado y por ende involucra un reemplazo menor de componentes, siendo relativamente costeable. Así mismo se establecen inspecciones programadas que permiten verificar el funcionamiento de los componentes de un sistema.

En el mantenimiento *preventivo condicional* (Figura 3), las acciones de mantenimiento se efectúan según diversos mecanismos que dependen de las

mediciones tomadas de las entradas y salidas del sistema/equipo tratado.

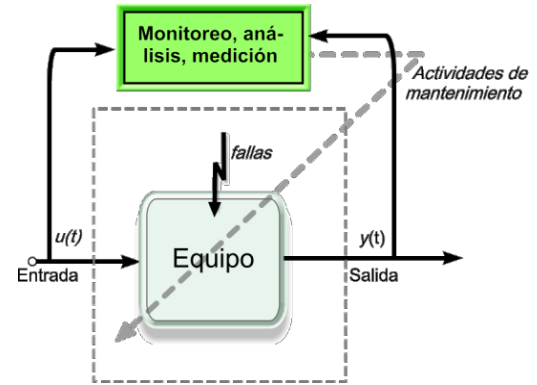


Figura 3. Tipos de mantenimiento para sistemas/equipos

Para la compañía eléctrica [2-4] en el mantenimiento del equipo, es conveniente tomar en cuenta los aspectos siguientes:

- Histórico, análisis de resultados y tendencias obtenidas en inspecciones y pruebas.
- Condiciones operativas de equipos y recomendación de fabricantes.
- Necesidades de mantenimiento, refacciones y herramienta especial requerida.
- Formular las actividades de los programas de mantenimiento.
- Determinar actividades con prioridad de mantenimiento.
- Contar con personal especializado y competente.

A medida que se mejoran las técnicas de mantenimiento en la planta, se logra una mejor confiabilidad de los equipos y al mismo tiempo se obtiene una mayor productividad, se ve incrementada la seguridad y además se reducen los costos de operación. La Figura 4 muestra gráficamente la relación de desempeño/fiabilidad según el tipo de mantenimiento utilizado en planta. La parte superior indica que si los sistemas son mantenidos y además se les actualiza e incorpora mejoras físicas (se equipan), el desempeño y fiabilidad se ven favorecidos. El estudio presentado en este trabajo tiene como objetivo coadyuvar en las actividades mencionadas a partir de datos estadísticos que proporciona la compañía suministradora de energía eléctrica y que son utilizados para obtener la medida del atributo de fiabilidad y MTBF, lo que permitirá obtener datos de interés para definir estrategias de mantenimiento.

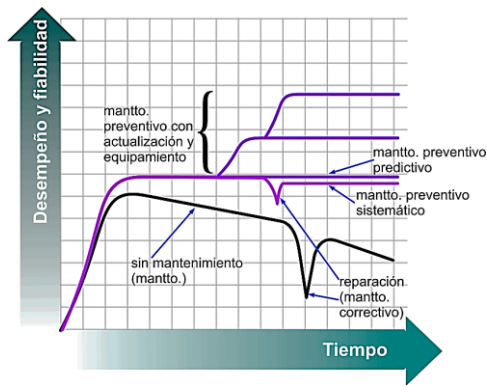


Figura 4. Tipos de mantenimiento para sistemas/equipos

4. Metodología propuesta

El método de Weibull es un método muy popular en ingeniería de fiabilidad para analizar y predecir fallas, averías (fallos) y malos funcionamientos de equipos electrónicos, eléctricos, mecánicos y sus combinaciones cuando son afectados por deterioro estocástico [6-8]. Además, las funciones probabilísticas basadas en este modelo permiten definir otro tipo de funciones probabilísticas conocidas, como se indicará más adelante, las cuales son usadas en otros tipos de equipos y fallos.

4.1. Modelo de Weibull

Para desarrollar el modelo de Weibull considerando los valores de falla y ciclos de trabajo proporcionados por la compañía eléctrica, se usa la función de densidad de probabilidad de tres parámetros (7):

$$f(t) = \frac{\beta(t-\lambda)^{\beta-1}}{\eta(\eta)} e^{-\left(\frac{t-\lambda}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

Donde $\eta \geq 0$ es el parámetro de escala (vida característica) β es el parámetro de forma y $\lambda \leq t$ es el parámetro de localización indicando el tiempo en el que inicia la falla, que para casos generales se asume ser 0 y así se denomina de dos parámetros

Es importante indicar que cuando $\beta < 1$ se obtiene la distribución gamma, cuando $\beta = 2$ se obtiene la distribución Rayleigh, cuando $\beta = 1$ se obtiene la distribución exponencial y cuando $\beta \sim 3.55$ se aproxima a la distribución normal. Así mismo, conforme β incrementa el promedio se aproxima a

η y la varianza a 0.

La función de distribución de probabilidad es entonces (8):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

Por lo tanto, la fiabilidad usando (3) es:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

De (7) y (8) se observa claramente que el parámetro de escala indica la vida característica del equipo/sistema, pues si se considera $t - \gamma = \eta$ la fiabilidad es 36.8% (es decir, la probabilidad de que falle el equipo/sistema es de 63.2%). La tasa de fallo usando (4) es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta(\eta)} \quad (19)$$

Tomando en cuenta la tasa de fallo (10), el parámetro β también indica situaciones de funcionamiento del equipo que modele:

$\beta < 1$: la tasa de fallo decrece con incremento en la vida del equipo, se describen fallos en etapa joven o temprana;

$\beta = 1$: la tasa de fallo es constante, se describen fallos aleatorios a lo largo de un periodo de vida útil del equipo;

$\beta > 1$: la tasa de fallo incrementa drásticamente con decremento de la vida del equipo, los fallos de envejecimiento se describen de esta manera pues el equipo está desgastado.

La Figura 5 muestra la forma de la función de tasa de fallo para diferentes valores de β con valores constantes para η y γ .

El MTBF para esta distribución Weibull, usando (5) es:

$$MTBT = \eta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (11)$$

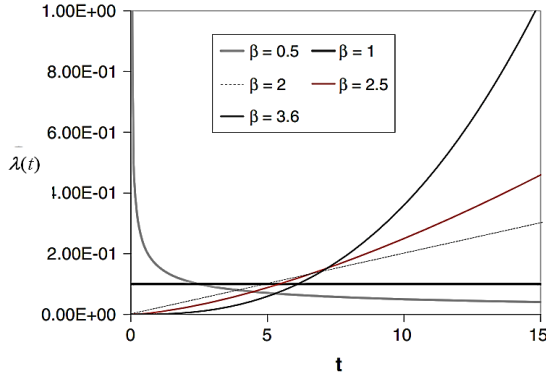


Figura 5. Tipos de mantenimiento para sistemas/equipos

Donde $\Gamma(\cdot)$ representa la función gamma definida como

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt = (\alpha-1)\Gamma(\alpha-1) \quad (12)$$

donde los valores de ésta función se hallan de Tablas [7, 8]. El promedio es:

$$\mu = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (13)$$

y la varianza:

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (14)$$

4.1.1. Análisis de Weibull

El análisis se realiza considerando los datos proporcionados por la compañía eléctrica respecto a los ciclos de falla o tiempos que trabajó el equipo de forma normal. Estos datos se ordenan asignándoles un rango (posición que guardan según el orden de magnitud del ciclo). Para obtener la distribución de Weibull se asume $\eta = 0$ en (8) y se explicita el tiempo, como se muestra en (15) [8, 11]:

$$F(1) = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}}{1 - F(t)} \quad (15a)$$

De esta forma se puede graficar la distribución de los datos de forma que se pueda obtener una relación lineal gracias a los logaritmos naturales (ln). Antiguamente se utilizaba el papel de Weibull, una hoja graduada en escala logarítmica en donde se hacían coincidir los valores ajustados a la recta dada

por (15b) asumiendo para estimación que el miembro derecho de (15b) es constante.

La estimación de $F(t)$ para cada tiempo de fallo observado, es decir, $F(t_i)$ para cada t_i se realiza de forma analítica utilizando la fórmula de Benard [7]:

$$F(t_i) \approx \frac{i-0.3}{\eta+0.4} \quad (16)$$

donde η es la cantidad de muestras e i es el rango asignado a cada dato según su amplitud ordenada de menor a mayor. Cada valor $F(t_i)$ es llamado rango o valor medio de fallo.

4.1.2. Cálculo de valores

Utilizando ajuste de curvas (ecuación de la recta) para calcular la pendiente de la recta y su intersección con el eje de las ordenadas, se obtienen los valores de β y de η tomando en cuenta que (15b) tiene la equivalencia con (17):

$$y = \alpha x + b \quad (17)$$

donde β es la pendiente y η es la intersección con el eje de las ordenadas $-\beta \ln(\eta)$.

5. Desarrollo de la aplicación

En últimas fechas, la compañía suministradora de energía eléctrica en la localidad de Apizaco, Tlaxcala, México (división centro-oriente), ha reportado paros repetidos en los interruptores de potencia de una marca reconocida y que representan el 7.7% del global en el estado, sin embargo, representa el 95% de la localidad. La duración de estos equipos sometidos a funcionamiento produjo los tiempos de fallo expresados en meses mostrados en la segunda columna de la Tabla 1.

Tabla 1. Datos proporcionados para el análisis de Weibull

No. de datos	Tiempo de fallo	Valores
1	1.8	0.0673
2	3.4	0.1635
3	5.1	0.2596
4	6	0.3558
5	8.2	0.4519
6	9	0.5481
7	10.9	0.6442
8	12.8	0.7404
9	18.1	0.8365
10	21.9	0.9327

La primera columna muestra el rango de cada valor. Los valores medios de fallos, utilizando (16), se tabulan en la tercera columna de la Tabla 1. Utilizando (15b) se obtiene el gráfico lineal mostrado en la Figura 6, donde el eje de las ordenadas muestra el miembro izquierdo de (15b), mientras que el eje de las abscisas muestra el logaritmo del tiempo (ciclos).

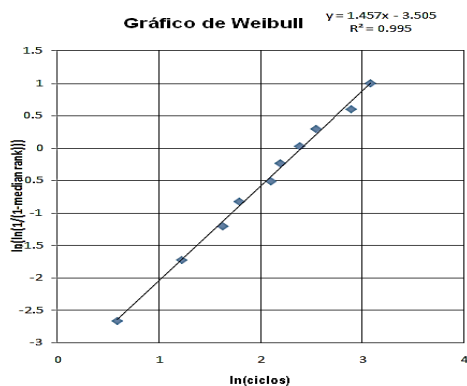


Figura 6. Tipos de mantenimiento para sistemas/equipos

La importancia del gráfico mostrado en la Figura 6 radica en que, por medio del ajuste de curvas, se deducen los valores importantes de esta recta: la pendiente y el valor en el eje de las ordenadas. Los valores obtenidos a partir de la recta de la Figura 5, $\gamma = 1,45 \times 3.505$ y utilizando (15) y (17), son:

$$\beta = 1.45, \quad \eta = 11.05$$

Con estos valores se obtiene utilizando (11), un MTBF de 10.93 meses y, usando (14), una desviación estándar de 7.25 meses con un promedio de 10.026 meses según (13), valores que se muestran en la Figura 7, que presenta la curva de función de

densidad de probabilidad, $f(t)$ para los equipos analizados.

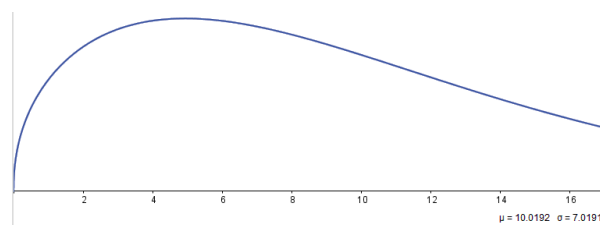


Figura 7. Función de densidad de probabilidad calculada

6. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos llevan a las siguientes consideraciones:

1. El valor de $\beta (> 1)$ obtenido corresponde a equipos en la zona de desuso o de desgaste.
2. El valor de η indica que son 11 los meses (ciclos) en los que el 63.2% de los equipos fallará, en otras palabras, la fiabilidad (equipos que aun funcionarán más de 11 meses) es 37.13% (ver Figura 8).
3. Las acciones de mantenimiento planeado deben aplicarse antes de los 6 meses, pues en ese tiempo todavía más de la mitad del equipo seguirá funcional (66.41% exactamente).

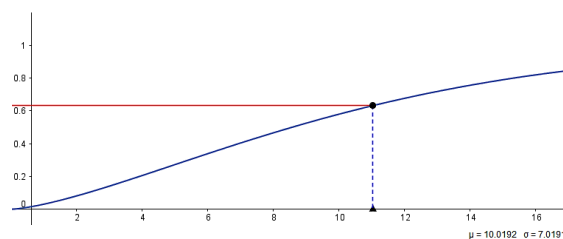


Figura 8. Función acumulativa de probabilidad, con el valor de fiabilidad para η calculado.

Aun cuando la complejidad del modelo implica el uso del cálculo integral y diferencial a través de métodos denominados como método estadístico, existe una técnica gráfica y sencilla que puede ser utilizada fácilmente por personal de mantenimiento en la planta. Existe software común que puede realizar la tarea, tal como hojas de cálculo o software libre para manipulación estadística de datos. La opción del uso del gráfico probabilístico de Weibull puede ser factible en el caso puramente gráfico, consultar [11] para una descripción del método.

En el caso de la aplicación de esta metodología en una empresa de suministro eléctrico, se obtuvo que: se presentan fallos debido a obsolescencia, fatiga, corrosión, deterioro mecánico, eléctrico, hidráulico o por el escaso mantenimiento que se le ha practicado (antigüedad de al menos 18 años); asimismo la fiabilidad de los interruptores de potencia que utiliza es baja con un 32.31% del global y que la tasa acumulada de fallos es sumamente elevada con un 67.69%, para un año. Además, derivado de este análisis, los interruptores de potencia reportan una duración ciclo de trabajo de 10.93 meses antes del fallo, con un promedio de funcionamiento de 10.026 meses y que la desviación típica de estos equipos resulta ser de 7.25 meses. Incluso cuando el método no evidencia con detalle las variables que afectan a estos equipos, el departamento de mantenimiento tendrá que programar una tarea de libranza para ejecutar los trabajos respectivos a la brevedad, así como cumplir a plenitud las sugerencias de la norma [3, 4], si no se desea correr el riesgo de sufrir continuos cortes de energía eléctrica, pues apenas en 6 meses se tendría un tercio del equipo funcional, tal y como se indica en el gráfico de tendencia de la Figura 4.

7. Conclusiones

Resulta evidente que cuando no se dispone en planta de herramientas especializadas para realizar el mantenimiento preventivo y predictivo, se puede hacer uso de la información que proporcionan los reportes de fallos del departamento de mantenimiento de los diferentes equipos con que cuenta la compañía. A través de esta información, es posible trazar curvas características de fallos que pueden ser ajustadas a una simple ecuación de primer grado o bien a modelos polinomiales.

Sin embargo, estadísticamente la distribución de Weibull resulta de especial interés ya que incluye un amplio grupo de modelos estocásticos que son de gran utilidad para el análisis de fallos en el mantenimiento de la planta que, dependiendo del tipo de equipo analizado, puede ajustarse para definir directivas de mantenimiento más allá del correctivo.

Esta información puede servir para definir una estrategia basada en mantenimiento preventivo sistemático con la finalidad de mantener un servicio

eléctrico confiable y al mismo tiempo cumplir satisfactoriamente el periodo de vida útil propuesto por el fabricante y sugerido en la norma, que es de 30 años para estos equipos.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por CINCSE: calidad, ingeniería, capacitación y servicios (<http://cincse.dx.am>).

Referencias

1. Grigsby, L. (2001) *The Electric Power Engineering Handbook*, CRC-IEEE Press, Boca Raton, Florida, USA.
2. Harper E. (2010) *Fundamentos de instalaciones de mediana y alta tensión*, Oceánica, México, D.F.
3. Comisión Federal de Electricidad. Norma NRF-028-CFE-2007, Interruptores de potencia
4. Comisión Federal de Electricidad. Norma NRF-022-CFE-2010, Interruptores de potencia
5. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Consultado 15 enero 2016, en: <http://www.ieee.org/>.
6. Martorell, S.; Sanchez, A. and Serradell, V. (2009) Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering and System Safety*, 64, 19-31.
7. Jardine, A. K. and Tsang, A. H. (2013) *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*, 2nd ed., The CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
8. Verma Ajit K., Ajit Srividya and Karanki DurgaRao (2016) *Reliability and Safety Engineering*, 2nd ed., Springer-Verlag, London, UK.
9. International Electrotechnical Commission (IEC), Consultado: 15 enero 2016, en: <http://www.iec.org/>.

10. National Electric Code (NEC), Consultado 15 enero 2016, en: <http://www.nec.org/>.
11. Bertsche, B. (2008) *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*, Springer-Verlag, London, UK.