

**DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD Y LA ESTIMACIÓN
PUNTUAL POR MÁXIMA VEROSIMILITUD EN TRANSFORMADORES
DE DISTRIBUCIÓN.**

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL BOGOTÁ. FACULTAD DE INGENIERÍA.
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Carrera 70 No. 53 – 40. PBX. (571) 4232700 Ext. 1867 – 1866

E.mail: mariag.magor@unilibre.edu.co – ismael.marquez@unilibre.edu.co

Bogotá, D.C. – Colombia

Resumen

Esta investigación desarrolla una teoría aplicada a la confiabilidad y la estimación puntual por máxima verosimilitud en sistemas eléctricos que permiten determinar el tiempo promedio entre fallas (TPEF) en transformadores monofásicos de poste utilizando las ecuaciones de Weibull y un parámetro que maximiza la función de verosimilitud, lo cual hace posible determinar el período de vida de estos equipos. Los resultados indican un bajo nivel de confiabilidad para los transformadores objeto de este estudio en Venezuela. Por su parte, la muestra analizada de equipos en Colombia indica que la probabilidad de falla está influenciada por las condiciones ambientales, además al aplicar este método de máxima verosimilitud a los equipos fallados se obtiene un estimador puntual y un intervalo de error razonable cuya aproximación es útil para revisar los planes de mantenimiento de las empresas del sector eléctrico. Se concluyó que las inversiones requeridas por este sector son impostergables, por lo tanto, se recomienda la implementación de programas de mantenimiento a corto, mediano y largo plazo de manera inmediata.

Palabras claves: confiabilidad, estimación puntual por máxima verosimilitud, transformador monofásico, mantenimiento.

1. Planteamiento del problema

La gerencia del mantenimiento abarca procesos de organización, planificación, programación, ejecución, control y retroalimentación de la función mantenimiento para su mejoramiento continuo (Zambrano y Leal, 2006). Algunos autores apoyan que el proceso de control se debe realizar por medio de indicadores de gestión, para este caso de mantenimiento, estos deben enfocarse en comprobar que se está gestionando de la mejor manera, midiendo, comparando, analizando y corrigiendo para evitar los errores y desviaciones, a fin de que los procesos se hagan inteligentes, aprendan y se formen con base a realidades y vivencias. La gestión integral de mantenimiento debe abarcar controles desde el nivel técnico operacional hasta el nivel gerencial de la misma e inclusive con la gerencia general. En ese orden de ideas, los indicadores de mantenimiento relacionados con la confiabilidad permiten determinar el TPEF (Tiempo promedio entre fallas) de acuerdo a la probabilidad de probabilidad de falla y de sobrevivencia aplicando el método de mínimos cuadrados. Con esa referencia se pueden realizar ajustes en las rutinas y frecuencias de inspección por una parte, por la mejorar los planes y programas de mantenimiento en las empresas prestadoras de servicio.

De manera comparativa a las variables de medición se utiliza también, la estimación puntual por máxima verosimilitud de equipos fallados en un período, al igual que para la confiabilidad. Esta revisión ajusta de mejor manera los costos y la gestión de mantenimiento.

2. Justificación

La confiabilidad inherente de un sistema o equipo, es la máxima confiabilidad que este puede alcanzar basado en su diseño y en su proceso de fabricación. El mantenimiento puede incrementar la confiabilidad pero no su confiabilidad inherente. Independiente del tipo y complejidad del sistema bajo estudio, se requieren tres pasos esenciales para la evaluación de la confiabilidad de un sistema. Primero se debe construir un modelo para el análisis, después se debe hacer el análisis del modelo y el cálculo de los índices apropiados de confiabilidad, y por último se debe hacer una evaluación e interpretación de los resultados analizados [2]. De manera global, la confiabilidad se utiliza para medir el desempeño y/o comportamiento de sistemas, equipos y/o componentes individuales, con fines de garantizar: la optimización de los costos de diseño, mantenimiento, calidad y producción; la seguridad humana, industrial y ambiental; la cantidad y consecuencia de las fallas; la calidad de los productos, entre otros aspectos.

3. Marco teórico

Confiabilidad: la confiabilidad se define como “la probabilidad de que un componente o equipo no falle estando en servicio durante un período determinado”, cuando es operado en condiciones razonablemente uniformes de voltaje, corriente, potencia, frecuencia, entre otros.

Los parámetros utilizados para el estudio de confiabilidad son: tiempo promedio entre fallas, probabilidad de supervivencia y rata de fallas $r(t)$, como se indica a continuación [3]:

Probabilidad de supervivencia

$$P_{(s)} = 1 - P_{F(t)} \quad (1)$$

$$P_{s(t)} = e^{-\int_0^t r(t) dt} \quad (2)$$

La vida útil de un equipo está dividida en tres períodos separados, los cuales se definen en función del comportamiento de la rata de fallas: arranque, operación normal y desgaste (obsolescencia) [4].

A continuación en la figura 1, se muestra la curva característica que representa los períodos de vida de un equipo:

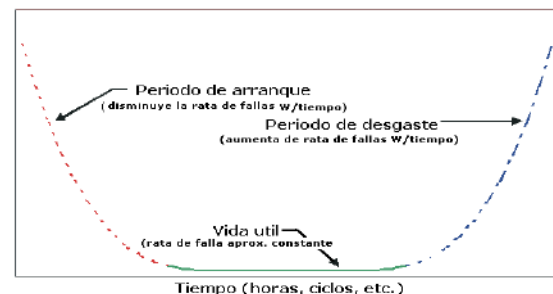


Fig. 1. Curva característica que representa los períodos de vida de un equipo.

Para estimar la condición del equipo en estudio, que en el caso de la presente investigación corresponde a transformadores fallados, se aplica de manera bastante útil la *Distribución de Weibull*, [5] ya que describe las fallas durante cualquier período en la vida de un equipo. La estimación de

los parámetros que aplican a este modelo de distribución se obtiene, a partir de la función de sobrevivencia por el método de mínimos cuadrados. A los valores obtenidos en la distribución se les llama “ V ” vida característica o edad característica en el momento de la falla, y el valor de “ K ” es una media de dispersión y se utiliza para calcular la varianza o período de vida de un equipo, donde si “ K ” < 1 supone una tasa de falla decreciente o también conocida como “mortalidad infantil”, si “ K ” = 1 supone una tasa de falla constante o también conocida como operación normal, en cambio si “ K ” > 1 supone una tasa de falla creciente o también conocida como obsolescencia. De acuerdo a lo indicado anteriormente, se tomaron los resultados obtenidos del análisis estadístico [5], clasificando la frecuencia de fallas de los equipos, de acuerdo al mes de ocurrencia correspondiente, determinando la probabilidad de falla y sobrevivencia respectivamente, utilizando un modelo de “Planilla de análisis de falla” [6].

Método de máxima verosimilitud: uno de los mejores métodos para obtener un estimador puntual de un parámetro es máxima verosimilitud. Tal y como su nombre lo implica, el estimador será el valor del parámetro que maximiza la **función de verosimilitud** [7].

Supóngase que X es una variable aleatoria con distribución de probabilidad $f(x, \theta)$, donde θ es un parámetro desconocido. Sean X_1, X_2, \dots, X_n los valores observados en una muestra aleatoria de tamaño n . La *función de verosimilitud* de la muestra es:

$$L(\theta) = f(x_1, \theta) \cdot f(x_2, \theta) \cdot \dots \cdot f(x_n, \theta)$$

Nótese que la función de verosimilitud es ahora una función del parámetro desconocido θ . El

estimador de máxima verosimilitud de θ es el valor de θ que maximiza la función de verosimilitud $L(\theta)$. En el caso de una variable aleatoria discreta, la interpretación de la función de verosimilitud es clara. La función de verosimilitud de la muestra $L(\theta)$ es precisamente la probabilidad

$$P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n)$$

Esto es, $L(\theta)$ es la probabilidad de obtener los valores muestrales X_1, X_2, \dots, X_n . Por lo tanto en el caso discreto, el estimador de máxima verosimilitud es un estimador que maximiza la probabilidad de ocurrencia de los valores muestrales.

Predicción de confiabilidad: para cada rango se calcula la probabilidad de supervivencia. Luego, utilizando el método de mínimos cuadrados, a partir de esta función de sobrevivencia se pueden estimar los valores teóricos de V (*coeficiente de dispersión*) y K (*vida característica o edad característica*), calculando luego, el **TPEF**. A continuación lo indicado:

$$V = \exp \left[\frac{(N \sum_{i=1}^n Z_i b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i)}{(\sum_{i=1}^n Z_i b_i \sum_{i=1}^n b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i^2)} \right] \quad (4)$$

$$K = \frac{\sum Z_i b_i}{\sum b_i - \ln V \sum b_i^2} \quad (5)$$

$$TPEF = V * \left(1 + \left(\frac{1}{K} \right) \right) \quad (6)$$

Estimador de máxima verosimilitud: la función de probabilidad es la siguiente;

$$f_{x(x;p)} = \begin{cases} p^x (1-p)^{1-x} & x = 0, 1 \end{cases}$$

Donde p es el parámetro a estimar. La función de verosimilitud de una muestra de tamaño n es:

$$\begin{aligned} L(p) &= p^{x_1} (1-p)^{1-x_1} p^{x_2} (1-p)^{1-x_2} \dots p^{x_n} (1-p)^{1-x_n} \\ &= \prod_{i=1}^n p^{x_i} (1-p)^{1-x_i} \\ &= p^{\sum_{i=1}^n x_i} (1-p)^{n-\sum_{i=1}^n x_i} \end{aligned}$$

Se observa que si \hat{p} maximiza $L(p)$, entonces \hat{p} también maximiza $\ln L(p)$. Por consiguiente:

$$\ln L(p) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \ln p + \left(n - \sum_{i=1}^n x_i \right) \ln(1-p)$$

Ahora bien,

$$\frac{d \ln L(p)}{dp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{p} - \frac{(n - \sum_{i=1}^n x_i)}{1-p}$$

Al igualar a cero la expresión anterior y resolver para p , se tiene que $\hat{p} = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n x_i$. En consecuencia, el estimador de máxima verosimilitud de p es

$$\hat{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Relacionadas con el Transformador de Distribución: un transformador es una máquina eléctrica, que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

En la figura 2, se observan partes constitutivas del transformador de distribución monofásico.

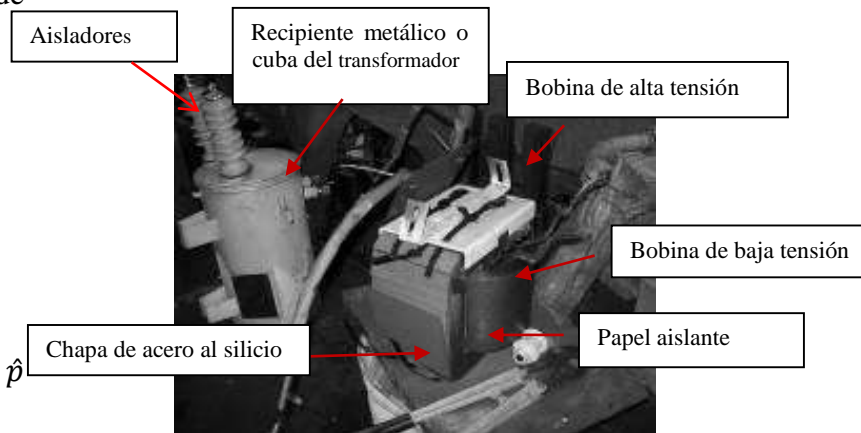


Fig. 2. Algunas partes constitutivas del Transformador de Distribución.

4. Estado del arte.

En el contexto de esta investigación se han revisado trabajos realizados por: Viveros, P; Stegmaier, R; Kristjanpoller, F; Barbera, L; Crespo, A (2013) realizaron una **propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo** que radica en un modelo para la gestión integral teniendo en consideración la característica de mejora continua en el tiempo. La importancia que tiene esta investigación en la alineación de objetivos a todo nivel organizacional para lograr la integración y correcta gestión de la unidad de mantenimiento. Otra investigación realizada por Azoy, A (2014) sobre el **método para el cálculo de indicadores de mantenimiento** entre los cuales se encuentran la disponibilidad de equipos, el tiempo medio entre fallas, el tiempo medio para la reparación y el costo de mantenimiento por facturación que son aplicados en las empresas de categoría mundial.

5. Marco conceptual

Confiabilidad operacional: es la capacidad de una instalación o sistema (integrados por procesos, tecnología y gente), para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.

Modo de falla: corresponde a la clasificación de las fallas funcionales/potenciales previamente definidas, en categorías de fallas (Mecánicas, eléctricas, instrumentación, etc.)

TPEF (tiempo promedio entre fallas): indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de una falla, es decir, es el tiempo medio hasta la llegada del evento “falla”.

6. Metodología

En la metodología utilizada se determina el resultado estadístico, calculando la probabilidad de falla y de supervivencia. Con lo anterior se construye la planilla de análisis de falla para determinar la Confiabilidad. Con ese resultado se aplica el método de mínimos cuadrados para determinar el TPEF. Luego, se determina el estimador puntual por el método de máxima verosimilitud. Este estimador se compara con la cantidad de equipos fallados y se determina el error. Con estos valores se justan los planes y programas de mantenimiento, rutinas, frecuencias de inspección.

7. Resultados obtenidos

A continuación, en la tabla 1 se muestra el resultado estadístico obtenido con el programa SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) del análisis de los transformadores fallados incluyendo el valor T(N) que fue calculado, de acuerdo a la cantidad de unidades falladas en el mes correspondiente. Seguidamente se muestran dos casos de referencia, uno corresponde a la empresa Corpoelec en Valencia, Venezuela y el

otro, a la empresa Codensa en Bogotá, Colombia [8,9]. Caso Venezuela: En la tabla 1 se presentan los resultados estadísticos de los ciento once (111) equipos analizados.

Tabla 1. Resultados estadísticos de equipos fallados.

Meses	Frecuencia	Porcentaje Valido	Porcentaje Acumulado	T(N) (equipos fallados)
1 enero	10	9,00900901	9,00900901	3,10000000
2 febrero	13	11,7117117	20,7207207	2,07692308
3 marzo	27	24,3243243	45,045045	1,14814815
4 abril	10	9,00900901	54,0540541	3,00000000
5 mayo	26	23,4234234	77,4774775	1,19230769
6 junio	14	12,6126126	90,0900901	2,14285714
7 julio	11	9,90990991	100	2,81818182
Total	111	100		

Fuente: M. Mago (2011).

Luego en la tabla 2, se muestra la Planilla de análisis de fallas. Después en la tabla 3, se indica la aplicación del método de mínimos cuadrados para obtener los valores de “V” y “K” respectivamente. A continuación, lo indicado:

Tabla 2. Planilla de análisis de fallas.

N	M(N)	Promedio Geométrico T(N)	Unidades falladas T(N)	Probabilidad de falla P(F)	Promedio Geométrico P(F)	Probabilidad de supervivencia P(S)	Promedio Geométrico P(S)
1	1	1,41421356	3,10000000	0,00892857	0,01262691	0,99107143	0,98658704
2	2	2,44948974	3,10000000	0,01785714	0,02187044	0,98214286	0,97766938
3	3	3,46410162	3,10000000	0,02678571	0,03032948	0,97321429	0,96873971
4	4	4,47213595	3,10000000	0,03571429	0,03929295	0,96428571	0,95981105
5	5	5,47722558	3,10000000	0,04464286	0,04839038	0,95535714	0,95088238
6	6	6,4807407	3,10000000	0,05357143	0,05786376	0,94642857	0,94195371
7	7	7,48331477	3,10000000	0,0625	0,06681531	0,93750000	0,93302503
8	8	8,48528137	3,10000000	0,07142857	0,07576144	0,92857143	0,92409636
9	9	9,48633298	3,10000000	0,08035714	0,08470397	0,91964286	0,91516768
10	10	10,4880885	3,10000000	0,08928571	0,09364365	0,91071429	0,906239
11	11	11,4891253	2,07692308	0,09821429	0,10258148	0,90178571	0,89731032
12	12	12,48996600	2,07692308	0,10714286	0,11151782	0,89285714	0,88838164
13	13	13,4907376	2,07692308	0,11607143	0,12045301	0,88392857	0,87945295
14	14	14,4913767	2,07692308	0,125	0,12938729	0,87500000	0,87052427
15	15	15,4919334	2,07692308	0,13392857	0,13832083	0,86607143	0,86159558
16	16	16,49242250	2,07692308	0,14285714	0,14725377	0,85714286	0,85266688
17	17	17,4928557	2,07692308	0,15178571	0,15618621	0,84821429	0,84373819
18	18	18,493242	2,07692308	0,16071429	0,16511823	0,83928571	0,83480949
19	19	19,4935887	2,07692308	0,16964286	0,1740499	0,83035714	0,82588079
20	20	20,4939015	2,07692308	0,17857143	0,18298126	0,82142857	0,81695209
21	21	21,4941853	2,07692308	0,1875	0,19191237	0,81250000	0,80802338
22	22	22,4944438	2,07692308	0,19642857	0,20084325	0,80357143	0,79909467

Fuente: M. Mago (2011)

Luego, se aplica el metodo de mínimos cuadrados obteniendose los valores de V y K , y del $TPEF$, respectivamente. En la figura 3, se muestra la curva de confiabilidad para el caso Venezuela:

Tabla 3. Aplicación del método de mínimos cuadrados

N	Ti	B=LnTi	bi-1/LnTi	bi²	yi-PS	Ln1/yi	A=Ln(Ln1/yi)	Zi=A/B	ZiBi
1	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,99107143	0,00896067	-4,71401789	-4,16652739	-3,58262296
2	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,98214286	0,01801851	-4,01635597	-3,54989258	-3,1376047
3	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,97321429	0,02715999	-3,6063418	-3,18749786	-2,81729884
4	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,96428571	0,03636764	-3,3140798	-2,9291759	-2,58897864
5	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,95535714	0,04567904	-3,08631285	-2,72786555	-2,41104867
6	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,94642857	0,05505978	-2,89933583	-2,56260422	-2,26498094
7	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,9375	0,06453852	-2,74049301	-2,42220956	-2,14089185
8	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,92857143	0,07410797	-2,60223217	-2,30006646	-2,03288153
9	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,91964286	0,08376988	-2,47968173	-2,19168515	-1,93714429
10	3,10000000	1,13140211	0,88385905	0,78120683	0,91071429	0,09352606	-2,36951519	-2,09431745	-1,85108144
11	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,90178571	0,10337835	-2,26935968	-3,10493701	-4,24817359
12	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,89285714	0,11332869	-2,17746296	-2,97920396	-4,07014569
13	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,88392857	0,12337902	-2,09249419	-2,86294572	-3,91708668
14	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,875	0,13353139	-2,01341868	-2,75475864	-3,76905968
15	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,86607143	0,14378789	-1,93941603	-2,65350825	-3,63052893
16	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,85714286	0,15415968	-1,86982471	-2,55829343	-3,50025606
17	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,84821429	0,16462198	-1,80410347	-2,46837365	-3,37722785
18	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,83928571	0,17520409	-1,74180376	-2,38313522	-3,26060466
19	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,83035714	0,18589938	-1,68254973	-2,30206387	-3,14968288
20	2,07692308	0,73088751	1,3681996	1,87197016	0,82142857	0,19671929	-1,62602322	-2,22472433	-3,04386694

Fuente: M.Mago (2011)

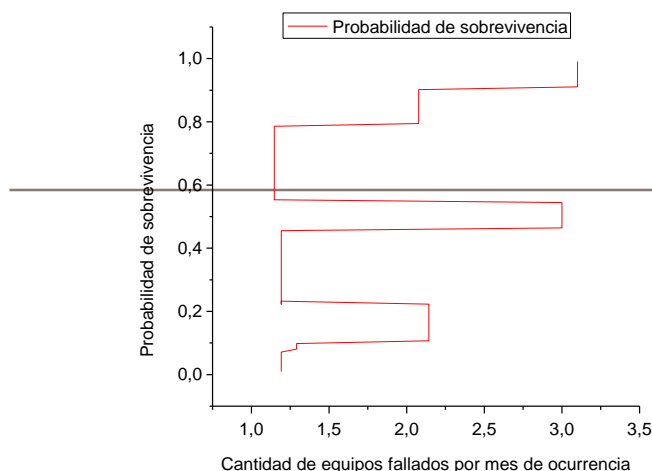


Fig. 3. Curva de Confiabilidad caso Venezuela.

Caso Colombia: la tabla 4 presenta los resultados estadísticos de los ciento veintinueve (129) equipos fallados. En la tabla 5, se muestra la nueva Planilla de análisis de fallas para este caso. Después en la tabla 6, se indica el método de mínimos cuadrados, para obtener los valores de “ V ” y “ K ” respectivamente.

Tabla 4. Resultados estadísticos de equipos fallados.

	Frecuencia	Porcentaje valido	Porcentaje acumulado	Unidades falladas T(N)
1 ABRIL	27	20,93023256	20,9302326	1,11111111
2 MAYO	46	35,65891473	56,5891473	0,67391304
3 JUNIO	6	4,651162791	61,2403101	5
4 JULIO	24	18,60465116	79,8449612	1,29166667
5 AGOSTO	26	20,15503876	100	1,19230769
Total	129	100		

Fuente: M. Mago (2011)

Tabla 5. Planilla de análisis de fallas.

N	M(N)	Promedio Geométrico T(N)	Unidades falladas T(N)	Probabilidad de falla P(F)	Promedio Geométrico P(F)	Probabilidad de sobrevivencia P(S)	Promedio Geométrico P(S)
1	1	1,414213562	1,11111111	0,00714286	0,01010153	0,99285714	0,98927927
2	2	2,449489743	1,11111111	0,01428571	0,01749636	0,98571429	0,98213636
3	3	3,464101615	1,11111111	0,02142857	0,02474358	0,97857143	0,97499346
4	4	4,472135955	1,11111111	0,02857143	0,03194383	0,97142857	0,96785055
5	5	5,477225575	1,11111111	0,03571429	0,03912304	0,96428571	0,96070765
6	6	6,480740698	1,11111111	0,04285714	0,04629100	0,95714286	0,95356474
7	7	7,483314774	1,11111111	0,05000000	0,05345225	0,95000000	0,94642183
8	8	8,485281374	1,11111111	0,05714286	0,06060915	0,94285714	0,93927892
9	9	9,486832981	1,11111111	0,06428571	0,06776309	0,93571429	0,93213602
10	10	10,48808848	1,11111111	0,07142857	0,07491492	0,92857143	0,92499311
11	11	11,48912529	1,11111111	0,07857143	0,08206518	0,92142857	0,91785019
12	12	12,48999600	1,11111111	0,08571429	0,08921426	0,91428571	0,91070728
13	13	13,49073756	1,11111111	0,09285714	0,09636241	0,90714286	0,90356437
14	14	14,49137675	1,11111111	0,10000000	0,10350983	0,90000000	0,89642146
15	15	15,49193338	1,11111111	0,10714286	0,11065667	0,89285714	0,88927854

Fuente: M.Mago (2011)

Tabla 6. Aplicación del método de mínimos cuadrados

N	Ti	B=LnTi	bi=1/LnTi	bi ²	yi=PS	Ln1/yi	A=Ln(Ln1/yi)	Zi=A/B	Zibi
1	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,99285714	0,00716849	-4,93806032	-46,8682291	-444,83679
2	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,98571429	0,01438874	-4,2413095	-40,2552121	-382,071174
3	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,97857143	0,0216615	-3,83221894	-36,3724425	-345,218944
4	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,97142857	0,02898754	-3,5408893	-33,6073682	-318,975008
5	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,96428571	0,03636784	-3,3140758	-31,4546307	-298,542898
6	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,95714286	0,04380262	-3,12806159	-29,6891284	-281,786123
7	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,95000000	0,05129329	-2,97019525	-28,1907839	-267,565002
8	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,94285714	0,0588405	-2,83292489	-26,8879204	-255,199234
9	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,93571429	0,0664451	-2,71137925	-25,7343036	-244,250001
10	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,92857143	0,07410797	-2,60223217	-24,6983644	-234,417672
11	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,92142857	0,08183002	-2,50311113	-23,7575046	-225,488522
12	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,91428571	0,08961216	-2,41226427	-22,8953369	-217,304736
13	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,90714286	0,09745534	-2,3283611	-22,0989932	-209,746461
14	1,1111111	0,105360506	9,49122248	90,083304	0,90000000	0,10536052	-2,25036733	-21,358737	-202,720525

Fuente: M. Mago (2011)

Seguido se calculan los valores de V y K, y del TPEF respectivamente. La figura 4 muestra la curva de confiabilidad del caso Colombia:

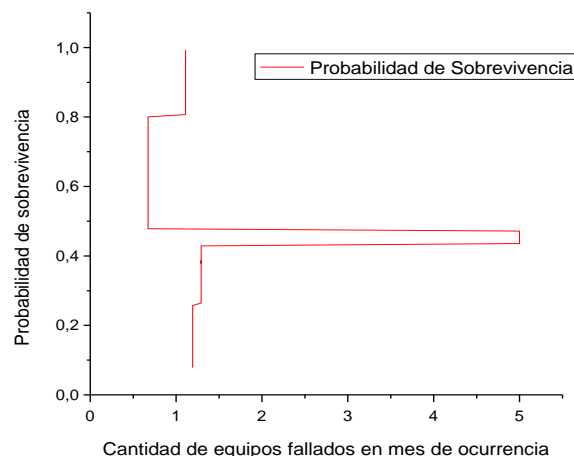


Fig. 4. Curva de Confiabilidad caso Colombia

La estimación puntual a la muestra de transformadores fallados y pérdidas totales del núcleo, considerando tipo de falla por arco eléctrico que es la de mayor incidencia. A continuación, se presentan los resultados obtenidos. (Ver figura 5).

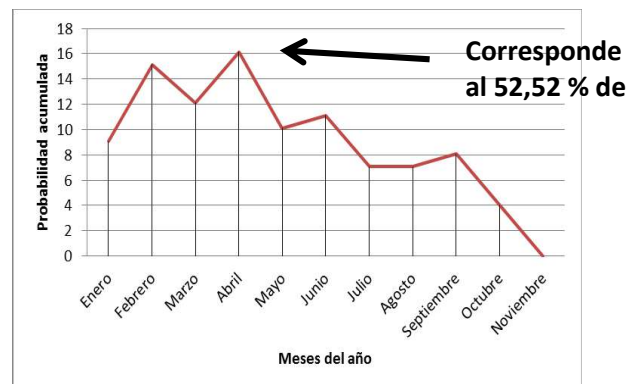


Fig. 5. Data equipos fallados año 2011. Región Caldas Cap. 5 kVA.

“El estimador de máxima verosimilitud corresponde a $\hat{p}=9$ lo cual indica que al menos nueve equipos fallaran en un mes”. Esta medición presenta un error estándar de 3,64% y un intervalo razonable para la falla promedio con una confianza del 95% que se encuentra entre $6,84481007 \leq \mu \leq 11,15518993$ para los límites inferior y superior respectivamente. “Esta estimación puntual es un valor de suma importancia en la implementación de planes o rutinas de mantenimiento preventivo y/o correctivo para las empresas operadoras del sistema eléctrico”.

8. Conclusiones

Caso Venezuela: como $K=B= 0,2353024$, es decir, $K<1$ se puede concluir que los equipos tienen una tasa de falla decreciente o también conocida como “mortalidad infantil”. Es importante revisar el estado de toda la red eléctrica, ya que esta condición indica, que los programas de mantenimiento preventivo y correctivo, deben aplicarse de inmediato. Hay alteraciones en el suministro de energía de forma imprevista. Las inversiones que requiere el sistema eléctrico, deben realizarse de manera inmediata. La confiabilidad es muy baja. Siendo el resultado para el TPEF de

30,0810927 lo cual muestra que, al menos treinta equipos fallarán en un mes.

Caso Colombia: como $K=B=1,28563392$, es decir, $K \approx 1$ se puede concluir que los equipos tienen una tasa de falla constante o también conocida como “operación normal”. Esta condición indica, que se están cumpliendo los programas de mantenimiento preventivo, sin embargo, se podría presumir, que algunos factores ambientales, inciden en las condiciones de funcionamiento, incrementando la probabilidad de ocurrencia de falla. Los costos indirectos para los usuarios de estas redes de distribución eléctrica, son elevados. Debe mejorarse la frecuencia de inspección, en los programas de mantenimiento preventivo. Siendo el resultado para el **TPEF** de **6,169198071** lo cual muestra que, al menos seis equipos fallarán en un mes. La estimación puntual aplicando el método de máxima verosimilitud es bastante exacto, los márgenes de errores son reducidos. La estimación del tiempo entre fallas permitirá el justeo en las frecuencias y rutinas de inspección que deben implementarse para estos equipos y sistemas de distribución, por parte de los operadores del sistema.

9. Referencias Bibliográficas

- [1] Zambrano, S & Leal, S. “Índices e Indicadores de Gestión de Mantenimiento en las Pymes del Estado Táchira”. 3er Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad Montevideo, Uruguay. 2006.
- [2] García, G. “Introducción a la Teoría de la Confiabilidad y su Aplicación en el Diseño y Mantenimiento de Equipos Industriales de un Proceso de Renovación”. Trabajo para optar a la categoría de promoción de profesor Asociado. Universidad Nacional, sede Medellín, Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Mecánica. 2006.
- [3] Nava, José. “Teoría de Mantenimiento. Fiabilidad”. Consejo de Publicaciones. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2004.
- [4] Nava, José. “Aplicación Práctica de la Teoría de Mantenimiento”. Consejo de Publicaciones. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2004.
- [5] Mago, María. “Análisis de Fallas en Transformadores de Distribución Utilizando Métodos No Convencionales”. Tesis de Maestría. Área de Estudios de Postgrado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela., 2011
- [6] Mago, María. “Análisis de Fallas en Transformadores de Distribución Utilizando el Software Estadístico SPSS (STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES)”. Revista Ingeniería e Investigación, Universidad Nacional de Colombia. Volumen 32, N° 2, PP 40-45. Bogotá, Colombia, 2012.
- [7] Montgomery, D; Runger, G “Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería”. Editorial McGRAW-HILL. Primera edición. México, 1996.
- [8] Normas para transformadores de distribución CADAFE. Caracas, Venezuela, 1979.
- [8] Viveros, P; Stegmaier, R; Kristjanpoller, F; Barbera, L; Crespo, A “Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo”. Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 1, pp. 125-138, 2013.
- [9] Azoy, A “Método para el cálculo de indicadores de mantenimiento”. Revista INGENIERÍA AGRÍCOLA, ISSN-2326-1545, RNPS-0622, Vol. 4, No. 4, pp. 45-49. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, 2014.

AUTORES: **María Gabriela Mago Ramos**: es ingeniera electricista. Tiene una Maestría en Ingeniería Industrial y otra en Ingeniería Eléctrica, además de Doctora en Ingeniería. Tiene amplia



**XX Congreso Internacional
de Mantenimiento
y Gestión de Activos**

9, 10 y 11 de mayo de 2018. Bogotá - Colombia



experiencia laboral en distintos sectores productivos en Mantenimiento y Operaciones. Actualmente se desempeña como docente del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Libre, seccional Bogotá. Telf.: 57)3167875313. Correo:

mariag.magor@unilibre.edu.co

Ismael Márquez Lasso: es ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene una Maestría en Ingeniería de la Universidad de los Andes. Actualmente, se desempeña como Director del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Libre. Teléfono celular: (+57) 3202721082 Correo:

ismael.marquez@unilibre.edu.co