

Índice de importancia, probabilidad de falla y confiabilidad de los componentes de las líneas áreas de distribución

*Carmen Vásquez *William Osal **Francir Briceño ***Carolina Blanco

Recibido: 31 de Mayo 2009, Aceptado: 24 de Octubre 2009

Resumen

Un número importante de las interrupciones del servicio eléctrico en los sistemas eléctricos de distribución son causadas por fallas en los componentes de las líneas aéreas, es decir que las acciones que pudieran implementarse para disminuirlas mejorarían la calidad del servicio que se presta. El objetivo del presente trabajo es determinar el índice de importancia, la probabilidad de falla y la confiabilidad de los componentes de las líneas eléctricas aéreas de distribución de 13.8, 24 y 34,5 kV, de las empresas CADAPE y ENELBAR, que sirvan para el futuro diseño de planes de mantenimiento. La metodología consiste en analizar las estadísticas de fallas ocurridas en el período del 2006 al 2008 y determinar estas variables, utilizando el software probabilístico Reliasoft Weibull ++ 7 ®. Como resultados se destaca que se analizaron un total de 969 fallas y se demuestra que el conductor y los conectores son los componentes con el índice de importancia y la probabilidad de falla más alta, en los tres casos en estudios. Se concluye que se puede diseñar planes de mantenimiento a este componente de forma que se permita orientar los recursos para la disminución de fallas en el servicio.

Palabras clave: Confiabilidad, índice de importancia, probabilidad de falla.

Importance index, failure probability and reability of the component of distribution aerial line

Abstract

A significant number of power interruptions in electric distribution systems are caused by component failures of airlines, namely that actions could be implemented to reduce them improve the quality of service provided. The aim of this study is to determine the importance indices, failure probability and reliability of the components of overhead power distribution lines of 13.8, 24 and 34.5 kV, of the ENELBAR and CADAPE, which serve the design future maintenance plans. The methodology consists of analyzing the statistics of failures occurred in the period from 2006 to 2008 to determine these variables, using the probabilistic software ReliaSoft Weibull ++ 7 ®. The results were analyzed a total of 969 failures and shows that the conductor and the connectors are the components with the importance indices and failure probability highest in all three studies. We conclude that maintenance plans can design this component so as to guide the reduction of resources for service failures.

Keywords: Failure probability, importance indices, reliability.

* *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Vicerrectorado Barquisimeto, Barquisimeto, Venezuela, cvasquez@unexpo.edu.ve, wosal@unexpo.edu.ve*

** *Administración y fomento Eléctrico CADAPE-CORPOELEC, Barquisimeto, Venezuela, francir15@hotmail.com*

*** *Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Vicerrectorado Luis Caballero Mejía Departamento de Sistemas, Caracas, Venezuela, cblanco458@gmail.com*

Introducción

El incremento que ha experimentado la demanda de energía en los últimos años ha llevado a las empresas encargadas de la generación, transmisión, distribución y comercialización a interesarse cada día más en la calidad del servicio que se presta [1]. Dentro de estas empresas, las encargadas de la distribución han determinado que un número significativo de sus interrupciones, y por ende del deterioro de su calidad, son debido a las fallas de sus componentes, entre ellos los aisladores, transformadores de distribución, descargadores de sobretensión, conductores y otros. En este sentido se ha incrementado el interés en disminuir estas fallas y tener clientes satisfechos con el servicio ofrecido.

Para minimizar la duración y frecuencia de las interrupciones se han establecido las siguientes recomendaciones:

- Diseño e instalación de sistemas eléctricos bajo estándares de confiabilidad [2,3].
- Implementación de planes de detección, señalización y localización de las fallas que permitan una rápida restauración del sistema [4]. Adicionalmente el uso de sistema de monitoreo continuo y de herramientas y equipos móviles de reserva [3].
- Implementación de técnicas de mantenimiento preventivo [5].

De estas recomendaciones las técnicas de mantenimiento preventivo han demostrado ser una alternativa eficiente que ha permitido disminuir el número de interrupciones a costos de inversión aceptables. Sin embargo sólo el 43 % de las empresas encargadas de la distribución de la energía eléctrica en Latinoamérica han brincado la brecha del mantenimiento correctivo al preventivo. Estos tipos de mantenimiento se distinguen en que se realizan antes de ocurridas las fallas. Dentro de sus ventajas se tiene que un número significativo de estudios han demostrado resultados satisfactorios en la disminución de las fallas en equipos [5]. Las técnicas de mantenimiento preventivo se clasifican, según la forma de determinar el tiempo para realizar las acciones de mantenimiento, en basado en el tiempo (TBM, según sus siglas en inglés), en basado en la condición (CBM, según sus siglas en inglés) y centrado en la confiabilidad (RCM, según sus siglas en inglés). De estos tipos el RCM ha permitido establecer acciones de mantenimiento a partir de la estadística de las fallas en los equipos, considerando que estas tienen características aleatorias, pero que su comportamiento se puede estimar a través de distribuciones típicas, siendo la más próxima la Distribución Weibull. El presente trabajo tiene como objeto determinar el índice de importancia, la probabilidad de falla y la confiabilidad de los componentes de líneas aéreas de distribución, de sistemas de tensión nominal de 13,8; 24 y 34,5 kV, de dos (2) empresas diferentes, que sirvan como base para el diseño de las políticas de mantenimiento. Los sistemas de 13,8 y 34,5 kV pertenecen a la empresa CA de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE) y el de 24 kV a la CA Energía Eléctrica de Barquisimeto (ENELBAR), ambas Venezolanas. La vida promedio de las líneas analizadas es de 30 años en servicio. El índice de importancia generalmente se ha determinado a través de información cualitativa del estado de los componentes en función de la experiencia de los operarios [6] o a través del análisis de la relación del número de fallas causadas por el daño de los componentes y del número total de fallas del sistema [7]. La probabilidad de falla y la confiabilidad de los componentes de líneas aéreas de distribución se determinan a través del análisis estadístico de las fallas de los componentes. Se analizaron las estadísticas de las fallas registradas para un período de 3 años, desde 2006 hasta el 2008. Para poder obtener los parámetros de la Distribución Weibull que se aproxime al comportamiento de los componentes analizados se utiliza el programa estadístico Reliasoft Weibull ++ 7 ®. Se consideraron los componentes: conductores, conectores, aisladores, cortacorrientes, descargadores de sobretensiones y transformadores de distribución. La estructura de la siguiente publicación esta dividida en apartados dedicados a presentar las definiciones del índice de importancia, probabilidad de falla y confiabilidad, según la literatura especializada en el tema, la descripción de la metodología empleada, los resultados y su posterior análisis.

Definiciones

El índice de importancia [7] se determina con la idea de dividir el número de fallas en el sistema causadas por el componente i en $(0, t)$, con el número de fallas del sistema en $(0, t)$. Una de las principales ventajas de este método es que se determina este índice de un componente a un pequeño costo en tiempo de cálculo, como se muestra en la ecuación (1).

$$Ip = \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

donde n_i es el número de fallas en el sistema causadas por cada i -componente y N es el total número de fallas en el sistema. Los autores [7] también proponen otra medida en que el denominador se sustituye por el número total de las fallas del sistema. Esta alternativa ofrece una indicación del porcentaje de fallas que son críticas. La probabilidad de falla tiene diferentes comportamientos según sea el periodo de vida del componente o equipo, ya que puede simularse como fallas decrecientes, constantes o crecientes, según sea el tiempo de uso del mismo [8]. La confiabilidad representa la probabilidad de no falla de los componentes, en este sentido se representa como el complemento de la probabilidad de falla. La Distribución Weibull se recomienda para el análisis de estos casos. Para ambas variables es necesario determinar previamente el Tiempo Entre Fallas (TEF), que es el tiempo en horas transcurrido en que ocurre una falla y la siguiente. En base al valor promedio de estos tiempos se determina el Tiempo Medio Entre Fallas (TMEF) con la ecuación 2.

$$TMEF = \frac{\sum_{i=1}^m TEF_i}{m}, \quad \text{con } i = 1, \dots, 7 \quad (2)$$

Las ecuaciones (3) y (4) representan la probabilidad de falla ($Pf_i(t)$) y confiabilidad ($R_i(t)$) por cada $i = 1, \dots, 7$ componente, respectivamente.

$$Pf(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

Donde β es el parámetro de la forma que caracteriza la estructura del TEF y la tasa de falla específica en el tiempo t . A mayor valor de β mayor es la tendencia que las fallas ocurran en el mismo momento. El tiempo t_0 es el parámetro de localización y representa el tiempo de aparición de la primera falla o inicio del deterioro del equipo, produciendo que la tasa instantánea de falla se incremente luego de t igual a t_0 . Finalmente η es el parámetro de la escala y representa la vida característica del equipo, refiriéndose al tiempo en el cual se espera que el 63,2% de las fallas ya hayan ocurrido en el equipo. El cuadro 1, muestra que para estudios de esta distribución se pueden dar las combinaciones de los parámetros de Weibull con equipos o sistemas con fallas particulares.

Metodología

El sistema analizado corresponde a tres (3) líneas de distribución aéreas de 13,8; 24 y 34,5 kV, con una vida útil similar de 30 años, pertenecientes a las empresas CADAFE y ENELBAR, ubicadas en zonas geográficas diferentes. La metodología seguida consiste en:

1. Con la estadística de interrupciones llevada por las empresas, a través de la bitácora de la subestaciones, entre el año 2006 al 2008, se determinan el número y duración de las fallas y sus causas.
2. Se determinan el TEF, el TMEF y el índice de importancia para cada componente: conductores, conectores, aisladores, cortacorrientes, descargadores de sobretensiones y transformadores de distribución.
3. Con el programa estadístico Reliasoft Weibull ++ 7 ® se determinaron los parámetros de la distribución Weibull que representa la función de la probabilidad de falla y de la confiabilidad por componente.

t_0	β	Característica
0	< 1	La tasa de fallas disminuye con la edad, sin llegar a cero. Se supone que el componente se encuentra en la etapa de juventud con un margen de seguridad bajo.
	1	La tasa de fallas se mantiene constante, indicando una característica de fallas aleatoria o pseudo-aleatoria. En este caso, la distribución Weibull coincide con la exponencial.
	$1 < \beta < 3,44$	La tasa de fallas se incrementa con la edad de forma continua, lo que indica que las interrupciones comienzan en el momento en que el equipo es puesto en servicio.
	> 3,44	Se cumple que la media es igual a la mediana y la distribución Weibull es sensiblemente igual a la normal.
> 0	< 1	Hay fatiga u otro tipo de desgaste y la tasa de fallas disminuye con el tiempo después de un súbito incremento de t_0 .
	> 1	Hay erosión o desgaste similar al anterior y la constante de duración de la carga disminuye continuamente con su incremento.
< 0	< 1	Hay fatiga u otro tipo de desgaste y la tasa de fallas disminuye con el tiempo después de un súbito incremento de t_0 .
	> 1	Hay erosión o desgaste similar al anterior y la constante de duración de la carga disminuye continuamente con su incremento.

Cuadro 1: Nava(2006)[9]

Resultados

Se analizaron 969 fallas, el cuadro 2 muestra el número de fallas totales para los niveles de tensión de 13,8, 24 y 34,5 kV. Adicionalmente el cuadro 3 muestra, para los mismos años de estudios, las fallas por componentes dañados. El cuadro 4 muestra el TMEF calculada para cada componente. Para el caso del

Mes	13,8 kV			24kV			34,5kV		
	2006	2007	2008	2006	2007	2008	2006	2007	2008
Enero	8	8	7	4	9	2	0	4	4
Febrero	9	19	15	0	2	3	0	1	3
Marzo	14	14	27	2	1	3	0	1	5
Abril	2	30	41	1	22	6	0	1	6
Mayo	2	30	41	1	22	6	0	1	6
Junio	24	23	12	0	6	0	0	4	5
Julio	12	16	20	7	3	6	0	0	2
Agosto	44	26	54	1	6	2	0	2	5
Septiembre	17	18	38	4	4	4	1	1	4
Octubre	43	22	27	11	8	6	6	1	10
Noviembre	19	12	13	6	2	0	5	1	10
Diciembre	27	7	6	14	1	0	5	1	6
Total	238	199	273	53	65	32	17	27	65

Cuadro 2: Número totales de fallas por mes para el período en estudio

sistema de 34,5 kV este tiempo no fue calculado debido al poco número de fallas ocurridas en este período. Adicionalmente el cuadro 5 muestra los parámetros para el cálculo de la confiabilidad para los niveles

de 13,8 y 24 kV. Finalmente el cuadro 6 contiene la confiabilidad y la probabilidad de falla determinada para un (1) mes, es decir, 720 h.

Componente	Número de Fallas		
	13,8kV	24kV	34,5 kV
Conductor	35	15	2
Cortacorriente	6	5	0
Conector	21	4	2
Tranformador de distribución	2	0	0
Descargador de sobretensión	3	0	1
Seccionador	1	1	0
Aislador	3	5	1
Total	34	31	5

Cuadro 3: Número de fallas por componente dañado para el total de años en estudio

Componente	TMEF (hr)	
	13,8 kV	24 kV
Conductor	758,7	1375,72
Cortacorriente	3027,53	3103,68
Conector	1242,66	2795
Tranformador de distribución	2268,1	0
Descargador de sobretensión	2265,77	0
Seccionador	2400	0
Aislador	1819	5919,32

Cuadro 4: TMEF, en horas, para cada componente dañado para el total de años en estudio.

Componente	Parámetros de Weibull					
	13,8 kV			24 kV		
	$t_0\sigma\gamma$	η	β	$t_0\sigma\gamma$	η	β
Conductor	-37,1	894	1,4	-0,05	696	0,3
Cortacorriente	128,73	2495	0,3	-159	3646	0,7
Conector	11,9	1251	0,9	*	*	*
Tranformador de distribución	*	*	*	-211	3406	0,5
Descargador de sobretensión	64,9	2118	0,8	*	*	*
Seccionador	3,2	3074	0,8	*	*	*
Aislador	25,5	1972	0,5	-127377	134948	47

Cuadro 5: Parámetros de la distribución Weibull determinados para cada componente.

Análisis de los resultados

Del análisis de fallas se puede estimar que de las fallas totales registrados por las empresas CADAFFE y ENELBAR, para el período 2006 al 2008, son del 12, 21 y 8 % corresponden a interrupciones temporales

a causas de fallas de los componentes de las líneas aéreas en los sistemas de 13,8; 24 y 34,5 kV, respectivamente. Para los tres (3) casos en estudios se demuestra que la causa predominante de la suspensión del servicio eléctrico es la debida a las fallas en las líneas de transmisión que alimentan a las subestaciones, a la falta de capacidad de generación y por fallas en sus componentes, en este orden. Las figuras 1, 2 y 3 muestran las fallas de los componentes de las líneas bajo estudio.

Componente	13,8 kV			24 kV		
	Ip	R	Pf	Ip	R	Ip
Conductor	0,39	0,57	0,43	0,39	0,64	0,36
Cortacorriente	0,07	0,49	0,51	0,16	0,29	0,71
Conector	0,24	0,34	0,66	0,3	*	*
Tranformador de distribución	0,02	*	*	0,02	0,39	0,61
Descargador de sobretensión	0,09	0,43	0,57	0,09	*	*
Seccionador	0,03	0,26	0,74	0,03	*	*
Aislador	0,12	0,43	0,54	0,16	0,14	0,86

Cuadro 6: Índice de importancia (Ip), confiabilidad (R) y probabilidad de falla (Pf) para cada componente para un tiempo de 720 hr.*No pudo ser calculada

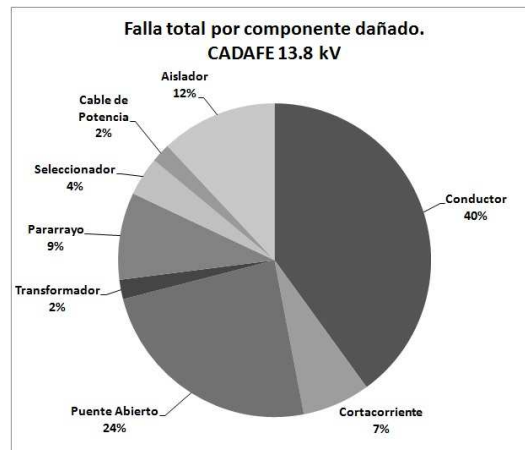


Figura 1: Fallas por componentes dañadas en líneas de 13,8 kV de la empresa CADAFE

En todos los casos en estudios resulta que el componente con mayor índice de importancia y probabilidad de falla es el conductor y los conectores, en este sentido las acciones de mantenimiento deben estar dirigidas a la inspección y alternativas de solución a fallas de estos elementos para planes de mantenimiento CBM. Según los parámetros de la Distribución Weibull determinados para el conductor, su confiabilidad se determina con la ecuación (5), para el caso de las líneas en 13,8 kV.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t+37,1}{8,94}\right)^{1,4}} \tag{5}$$

En este sentido, para los planes de mantenimiento de RCM, de debe igual esta ecuación a la confiabilidad deseada del componente para poder estimar el tiempo futuro de una falla. Por ejemplo si se desea una confiabilidad de 0,99 y de 0,5, el tiempo estimado para una futura falla es de 560 y 1456,3 hr, equivalentes a 23 y 61, días, respectivamente. Lo que demuestra la principal diferencia entre ambas técnicas de manteamiento. Como se puede observar la probabilidad de falla y la confiabilidad del las líneas de 34,5 kV no puedo ser determinado por la escasez de datos para calcular el TEF y el TMEF. Sin

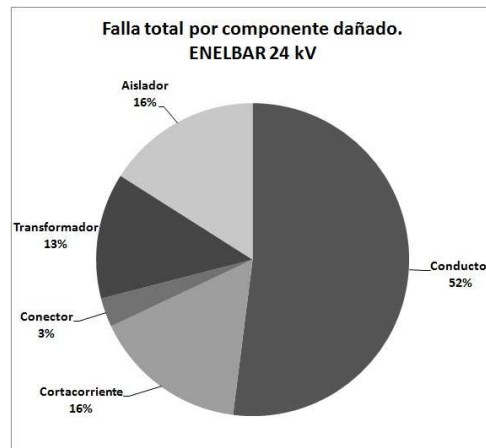


Figura 2: Fallas por componentes dañadas en líneas de 24 kV de la empresa ENELBAR

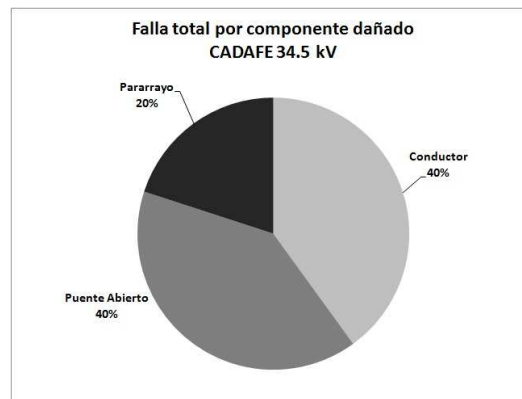


Figura 3: Fallas por componentes dañadas en líneas de 34,5 kV de la empresa CADAFE

embargo el índice de importancia se puede calcular a partir de conocer sólo la relación entre el número de fallas por componente del total, como se muestra en el cuadro 7. Índice de importancia (I_p), confiabilidad (R) y probabilidad de falla (P_f) para cada componente de las líneas de 34,5 kV de CADAFE.

Componente	34,5 kV		
	Ip	R	Pf
Conductor	0,4	*	*
Cortacorriente	0	*	*
Conector	0,4	*	*
Tranformador de distribución	0	*	*
Descargador de sobretensión	0,2	*	*
Seccionador	0	*	*
Aislador	0	*	*

Cuadro 7: Índice de importancia (Ip), confiabilidad (R) y probabilidad de falla (Pf) para cada componente de las líneas de 34,5 kV de CADAPE.*No pudo ser calculada

Conclusiones

Se determina el índice de importancia, la probabilidad de falla y la confiabilidad de los componentes de las líneas eléctricas de distribución 13,8; 24 y 34,5 kV durante en el periodo comprendido entre 2006 y 2008, basándose en las estadísticas de fallas registradas. Los componentes estudiados: conductor, cortacorriente, puente abierto, transformador de distribución y descargadores de sobretensión, seccionador, conductor y aislador. Se determina la probabilidad de falla de cada uno de estos componentes por medio del software Reliasoft Weibull ++ 7 ®. Con ello se plantean todos los datos necesarios para elaborar y accionar un plan de mantenimiento que permita reducir la probabilidad de falla en cada componente. Se elabora un análisis de fallas de las líneas de distribución de 13,8, 24 y 34,5 kV para el periodo 2006-2008. Este análisis arroja un total de 969 fallas temporales, de las cuales 710, 150 y 109 fallas son de las líneas de distribución 13,8; 24 y 34,5 kV, respectivamente. Se observa que los principales motivos que producen las fallas en 13,8 y 24 kV son fallas en la líneas de transmisión, generación y en componentes. Se elabora una matriz de falla de los componentes de la línea distribución para cada nivel de tensión, donde se obtiene un total de 86 fallas por componentes dañados para los circuitos 13,8 kV, observando que los principales componentes que ocasionan fallas son el conductor, conector y aislador. En los circuitos de 24 kV se registra un total de 31 fallas por componentes dañados, siendo el conductor, cortacorriente y aislador los que presentan el mayor número de fallas en este nivel de tensión. Y, finalmente, para los circuitos 34,5 kV sólo se registran 5 fallas por componentes dañados.

Agradecimiento

Los autores quieren expresar su agradecimiento a las empresas CADAPE, ENELBAR, a la DIP de la UNEXPO y a la Acción de Coordinación EFESOS del CYTED, por el apoyo prestado para llevar a término el presente trabajo.

Referencias

- [1] Torres, G. M. Acero, J. Flechas, J. V. Saucedo y C. Quintana. "Marco Conceptual sobre la Calidad de la Energía Eléctrica". ICONTEC. Energía Eléctrica, Un Producto con Calidad-CEL-. Colombia, Bogotá. 2002. Pp 69-99.
- [2] A. Baggini, D. Chapman, F. Buratti. "Reliability of Electricity Supply: Structure". WILEY. Handbook of Power Quality. England. 2008. Pp 383-402.

- [3] R. Villafáfila-Robles, J Bergas-Jané. “Reliability of Electricity Supply: Appliances and Equipment”. WILEY. Handbook of Power Quality. England. 2008. Pp 403-444.
- [4] P. Caramia, G. Carpinelli, P. Verde. “Advance methods and nonstationary waveforms. WILEY. Power Quality Indices in Liberalized Markets. England. 2009. Pp 141-186.
- [5] A.M Smith, G. R. Hincheliffe. Wordl Class Maintenance (WCM)-Opportunity and Chanllenge. EL-SIVIER. RCM Gate to Wordl Class Maintenance. England. 2004. Pp 1-18.
- [6] M.A. Escobar, E. Sierra, S. Lajes. “Determinación del Nivel de Deterior Utilizando Lógica Difusa”. Ingeniería. Vol. VII. No. 23. 2004. Pp 30-36.
- [7] P. Hilber, L. Bertling. Component Reliability Importance Indices for Electrical Networks. The 8th International Power Engineering Conference IPEC2007. Singapore. 2007. Pp 7.
- [8] C. Vásquez, M.C. Blanco, W Osal. Índice de Confiabilidad de Líneas Aéreas de Distribución. IV Simposio Internacional sobre Calidad de Energía Eléctrica SICEL2007. Manizales, Colombia. 2007. Pp 6.
- [9] J.D. Nava. Teorías de mantenimiento. Definiciones y organización. Consejo de Publicaciones ULA. Mérida, Venezuela. Pp 15-77.