

Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra

Quality of the electric power under the perspective of the systems of earthing

Mercado Polo, Verena ^{1*}; Peña, José Bernardo ²; Pacheco, Luis ³

^{1,2} Postgrado en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui.

³ Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui.

*verenamercado@yahoo.com

Resumen

La calidad de energía depende de las condiciones normales de operación de los sistemas eléctricos en cuanto a estabilidad (voltaje y frecuencia), distorsión de las señales y la continuidad del servicio. Asegurar altos niveles de calidad requiere del estudio de la influencia del conexionado adecuado de los sistemas de puesta a tierra, a lo largo de toda la cadena de valor (generación, transmisión, distribución), bajo la perspectiva de su contribución en la estabilidad, disminución de perturbaciones e interrupciones del servicio eléctrico. En este orden de ideas, en el presente trabajo se realiza una revisión bibliográfica centrada en teorías e investigaciones científicas de las mejores prácticas para el diseño, construcción y mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, complementándose con un análisis exploratorio de los datos históricos de un caso particular del sistema eléctrico Venezolano, donde se demuestra que alrededor del 30% de los problemas de interrupciones y perturbaciones en las líneas de transmisión son producto de las altas resistencias en los sistemas de puesta a tierra o por la falta de continuidad entre los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Palabras clave: Calidad de energía, puesta a tierra, perturbaciones, sistema eléctrico venezolano.

Abstract

The quality of energy depends on the normal conditions of operation of the electrical systems as for stability (voltage and frequency), distortion of the signs and the continuity of the service. High places assure quality levels it needs of the study of the influence of the suitable hookup of the systems of earthing, along the whole chain of value (generation, transmission, distribution), under the perspective of his contribution in the stability, decrease of disturbances and interruptions of the electrical service. In this order of ideas, in the present work there are realized a bibliographical review centred on theories and scientific investigations of the best practices for the design, construction and maintenance of the systems of earthing, complementing itself with an exploratory analysis of the historical information of a particular case of the electrical Venezuelan system, where there is demonstrated that about 30% of the problems of interruptions and disturbances in the lines of transmission are a product of the high resistances in the systems of earthing or for the lack of continuity between the protection systems against atmospheric unloads

Key words: Quality of energy, earthing, disturbances, electrical Venezuelan system.

1 Introducción

La calidad de energía se enmarca dentro de una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan

la tensión y la corriente eléctrica, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia (IEEE 1159, 1995). El término calidad de energía debe ser considerado por los tres principales sectores involucrados en un sistema eléctrico: el productor, el consumidor y el fabricante de

equipos.

El estudio de la calidad de potencia eléctrica en instalaciones eléctricas y redes de distribución es un tema importante tanto para las empresas eléctricas como para los usuarios, ya que permite identificar posibles problemas y adoptar las soluciones requeridas en cada caso (Abreu 2005). Las cargas no lineales, las conmutaciones, las maniobras de cambio de carga o las propias averías de los equipos pueden ocasionar una mala calidad en el sistema eléctrico. Esta deficiencia no sólo implica un alto costo en términos de energía malgastada y tiempos de inactividad innecesarios, sino que también es peligrosa y aumenta el riesgo de fallas.

En la última década se han introducido en gran escala equipos electrónicos a los sistemas eléctricos y debido a que estos equipos son susceptibles a pequeñas fluctuaciones en los parámetros de tensión, corriente y frecuencia, es de suma importancia el estudio de la calidad de energía, el cual se ha convertido en un factor indispensable para garantizar el buen funcionamiento de equipos y mantener una alta confiabilidad en los sistemas de potencia.

Las perturbaciones en la calidad del suministro de energía eléctrica se enmarcan dentro de siete categorías, según la forma de la onda: transitorios, interrupciones, bajada de tensión, aumento de tensión (sobretensión), distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de frecuencia (IEEE 1159, 1995).

Para minimizar los problemas de calidad de la energía se busca que la potencia entregada sea constante, se mantenga dentro de los ámbitos de voltaje y frecuencia y posea una forma de onda senoidal libre de contenido armónico. Por lo tanto las variaciones en la tensión, las distorsiones armónicas y los transitorios eléctricos suelen ser los principales responsables de causar problemas de calidad de energía.

La relación entre la calidad de energía y los sistemas de puesta a tierra son cada vez de más interés en investigaciones científicas, como aporte se menciona (Malagón y col., 2013), donde se exponen una serie de buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de las perturbaciones de tipo transitorio, creadas por el impulso electromagnético generado durante la descarga a tierra de un rayo. Estas perturbaciones se ven a menudo reflejadas como sobretensiones y sobrecorrientes, las cuales inciden fuertemente sobre la operación de las instalaciones eléctricas de uso final. Las recomendaciones que se plantearon se relacionan con los sistemas de puesta a tierra descritos en la norma IEC (IEC 62305-3 y 62305-4, 2010). Estas prácticas o recomendaciones se orientan a su puesta en marcha durante la etapa de diseño y construcción de la instalación.

Los sistemas de puesta a tierra deben ser capaces de tolerar corrientes de cortocircuito durante el tiempo transcurrido entre la producción de la falla y la actuación de las protecciones e interruptores que la eliminan, sin deteriorar sus propiedades mecánicas ni eléctricas. Además, deben ser capaces de drenar corrientes a tierra, provenientes de even-

tos transitorios, tales como, descargas atmosféricas o por actuación de los pararrayos frente a sobretensiones, sin producir diferencias de potencial significativas que puedan ocasionar el deterioro prematuro de equipos importantes en la subestación, plantas industriales, edificaciones o líneas de transporte.

En el resto del artículo se realiza una revisión bibliográfica de las mejores prácticas para el diseño, construcción, evaluación y mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra y su influencia en la calidad de energía eléctrica; se continúa con los aspectos relacionados con la calidad de energía; luego se complementa con un análisis de un caso particular del sistema eléctrico Venezolano, la línea de 230 kV Tigre I-Barbacoa I, donde se demuestra que un gran porcentaje de los problemas de interrupciones y perturbaciones en las líneas, son producto de las altas resistencias en los sistemas de puesta a tierra. Posteriormente se presentan los resultados de este análisis. Finalmente se termina con las conclusiones de la investigación y con las referencias utilizadas para la generación de la misma.

2 Calidad de Energía y Sistemas de Puesta a Tierra

En este apartado se presenta una revisión de las contribuciones encontradas y en las cuales sus autores analizan los sistemas eléctricos en función de la calidad de la energía eléctrica y la importancia de los sistemas de puesta a tierra para disminuir las interrupciones del servicio eléctrico debido a descargas atmosféricas.

En la empresa EDELCA, se determinaron los beneficios que se obtendrían al instalar pararrayos en paralelo con las cadenas de aisladores de las líneas de transmisión a 115 y 400 kV. Se realizaron simulaciones mediante el programa ATP, de los modelos matemáticos de pararrayos tipo ZnO, torres y líneas de transmisión (Villa y col., 2001). De este trabajo se destaca que la instalación de pararrayos en las líneas de transmisión permite reducir la tasa de salida forzada de las líneas a causa de la menor probabilidad de impacto de un rayo en las mismas.

En el sistema eléctrico de Barquisimeto se analizaron alternativas para disminuir las interrupciones por impactos directos y cercanos de las descargas atmosféricas, las alternativas analizadas fueron: el sobreaislamiento, el cable de guarda o el uso de descargadores de sobretensiones distribuidos (IEEE 1410, 1997). Se evidenció que el uso de descargadores de sobretensión distribuidos con resistencia a tierra inferior a 7 Ohmios, constituyen una alternativa de orden práctico, viable, para proteger las líneas de distribución de energía eléctrica contra fallas y salidas del sistema eléctrico (Vásquez y col., 2004). Como regla general, cualquier alteración en el voltaje de una fuente de energía, bien sea corriente continua (DC = Direct Current) o corriente alterna (AC = Alternating Current) puede ser considerada como materia concerniente a la calidad de energía eléctrica. Problemas de calidad de energía eléctrica pueden ser eventos de gran velocidad, tales como, impulsos transitorios, va-

riaciones de frecuencia, fallas en la onda eléctrica, variaciones de voltaje y pérdida total de la energía.

Mediante un modelo de base electromagnética, se determinó la impedancia de puesta a tierra de configuraciones arbitrarias y su comportamiento ante excitaciones tipo impulso. La base general del modelo considerado se usó para valorar no sólo sobretensiones por descargas atmosféricas, sino también, otros transitorios típicos asociados con problemas de compatibilidad electromagnética (Gómez y col., 2006). Los resultados muestran que la impedancia de puesta a tierra juega un papel relevante en la solución de problemas de sobretensiones en sistemas de potencia, en especial cuando éstos son impactados por rayos.

Para analizar los efectos que presentan los sistemas de puesta a tierra sobre el neutro y la carga, se utilizó un modelo matemático del sistema de puesta a tierra y se simuló mediante el programa Simulink de MatLab, considerando dos casos, en función de si la descarga atmosférica impacta en el neutro del sistema o en una fase de la instalación (Castro y col., 2006). Una de las conclusiones más resaltantes de este trabajo es que a medida que se disminuye la resistencia del Sistema de Puesta a Tierra (SPT) de la instalación, la tensión en el neutro disminuye, así como la distribución de las corrientes por los SPT del centro de transformadores.

Los sistemas de puesta a tierra presentan relación con la frecuencia, y esto fue comprobado mediante el desarrollo de un programa computacional, que tuvo como objetivo analizar el comportamiento transitorio de cualquier configuración de electrodos de puesta a tierra inmersos en un terreno homogéneo, isotrópico y lineal (Montaña y col., 2006). Destacando de este artículo que un SPT no presenta un valor equipotencial en régimen transitorio como sí se observa en un análisis en estado estable, y que existe variación en la impedancia de puesta a tierra en función de la frecuencia.

Para disminuir la sobretensión transitoria ultra rápida (VFTO = Very Fast Transient Overvoltages) originada durante operaciones de maniobra en una subestación aislada en gas, se diseñó una red de puesta a tierra (IEEE 80-2000, 2000) con modelos detallados de la subestación y de la red de tierras, mediante un proceso iterativo se incorporan nuevos elementos a la red de tierras lográndose disminuir el VFTO en diversos puntos de la subestación. La metodología presentada permite obtener niveles adecuados de seguridad al personal y equipos asociados ante fenómenos transitorios producidos por maniobra (Gastón y col., 2008, Sverak 2000).

Para investigar el comportamiento de diferentes estructuras de sistemas de puesta a tierra ante la incidencia de descargas atmosféricas en líneas de transmisión equipadas con pararrayos, se utilizó un modelo matemático no lineal para analizar el comportamiento mediante simulaciones, donde se concluyó que los sistemas de puesta a tierra de las líneas de transmisión tienen una dependencia importante respecto a la frecuencia de las descargas atmosféricas que

impactan en las mismas, pudiéndose presentar sobretensiones que afectan la eficiencia de un sistema eléctrico de potencia (Sheshyekani y col., 2010).

Para analizar el comportamiento transitorio de redes de tierra, se propuso una metodología basada en el enfoque de la línea de transmisión utilizando el programa Simulink de MatLab, que permitió obtener las tensiones transitorias en cualquier punto de una red de tierra compleja, constituyendo esto una información muy valiosa para los diseñadores de redes de tierra (Gallego y col., 2014). Las corrientes provocadas por una descarga atmosférica pueden causar tensiones transitorias en sistemas ubicados cerca de los SPT, por lo que conocer las medidas de protección contra rayos requiere del conocimiento de la máxima elevación de la tensión entre el SPT y la tierra.

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) juegan un papel importante en la protección y seguridad de las instalaciones eléctricas, ya que ofrecen un camino de baja impedancia que permite mitigar los efectos producidos por fenómenos de carácter transitorio, tales como: fallas, operaciones de maniobra y descargas atmosféricas. Sin embargo, para que un SPT sea eficaz se debe garantizar que los equipos a proteger estén debidamente conectados a la red de tierra.

3 Aspectos Relacionados con la Calidad de Energía

Se entiende por calidad de la energía cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes (Téllez 2007).

La mala calidad de la energía eléctrica es cuando hay presencia de las siguientes perturbaciones: variaciones de voltaje, interrupciones, armónicos, en general eventos transitorios en sistemas eléctricos. Se ha encontrado que la mayoría de los problemas referidos a la calidad de la energía eléctrica están relacionados con problemas directos en las instalaciones eléctricas y no con el suministro eléctrico.

Se considera que hay dos tipos básicos de problemas en la calidad de la energía:

Los que crean la interrupción de cargas eléctricas o de circuitos completos.

Los que causan pérdidas en la operación del equipo eléctrico y el sistema de suministro eléctrico.

La calidad de energía también se puede definir como el proceso energizar y poner a tierra el equipo sensible de una manera adecuada para la operación del equipo (IEEE 1100, 1992, IEEE 1159, 1995). En la figura 1 se muestra la pirámide de calidad de energía, donde se observa que la base de la calidad de energía son los sistemas de puesta a tierra, un sistema eléctrico con diseño seguro permitirá la disminución de fallas relacionadas con interrupciones, eventos transitorios y variaciones en los parámetros fundamentales.



Fig.1. Pirámide de calidad de energía (nota en blanco y negro)

3.1. Interrupciones

Una interrupción se define como la pérdida total de tensión o corriente. Según su duración, una interrupción se clasifica como instantánea, momentánea, temporal o sostenida. El rango de duración para los tipos de interrupción son: instantánea 0,5 a 30 ciclos, momentánea 30 ciclos a 2 segundos, temporal 2 segundos a 2 minutos y sostenida mayor a 2 minutos.

Las causas de las interrupciones pueden variar, pero generalmente son el resultado de algún tipo de daño a la red de suministro eléctrico, como caídas de rayos, animales, árboles, accidentes vehiculares, condiciones atmosféricas destructivas (vientos fuertes, gran cantidad de nieve o hielo sobre las líneas, etc.), falla de los equipos o disparo del disyuntor básico. Los sistemas eléctricos deberán mitigar automáticamente muchos de estos problemas, mediante protecciones.

3.2. Transitorios Eléctricos

Los transitorios eléctricos se definen como perturbaciones aleatorias de alta energía y de muy corta duración, que no pueden ser detectados y/o despejados por los dispositivos de protección instalados, se dividen en dos subcategorías: transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios.

3.2.1. Transitorios Impulsivos

Son eventos repentinos de cresta alta que elevan la tensión y/o los niveles de corriente en dirección positiva o negativa. Los transitorios impulsivos pueden ser eventos muy rápidos (5 ns de tiempo de ascenso desde estado estable hasta el valor máximo del impulso) de una duración breve (menor a 1 ciclo). En la figura 2 se muestra un ejemplo de un transitorio impulsivo.

Las causas incluyen descargas atmosféricas, puesta a tierra deficiente, encendido de cargas inductivas, despeje de

fallas de la red eléctrica y descargas electrostáticas (EDS = ElectroStaticDischarge), y sus efectos pueden ir desde pérdidas (o daño de datos) hasta el daño físico a personal o equipos.

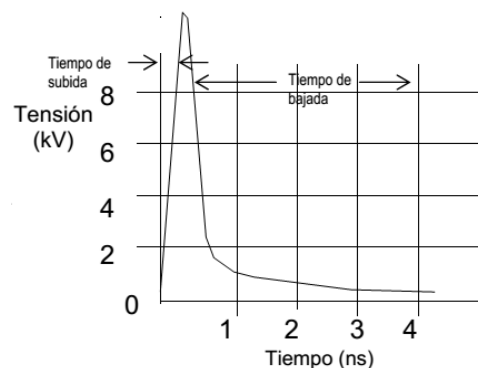


Fig.2. Transitorio impulsivo positivo

3.2.2. Transitorios Oscilatorios

Son eventos repentinos que afectan la condición de estado estable de la tensión o la corriente de una señal, tanto positivo como negativo de la señal, que oscila a la frecuencia natural del sistema, se produce un incremento en la tensión y luego un descenso de este valor de forma alternada y rápida.

Estos transitorios ocurren cuando se conmuta una carga inductiva o capacitiva, como un motor o un banco de capacitores. En la figura 3 se muestra un transitorio oscilatorio típico de baja frecuencia atribuible a la energización de los bancos de capacitores.

Otros problemas que relacionan los sistemas de puesta a tierra con la calidad de energía se muestran en la figura 4, se destacan los problemas de diseño y la falta de mantenimiento en los sistemas de puesta a tierra, los cuales pueden provocar perturbaciones transitorias.

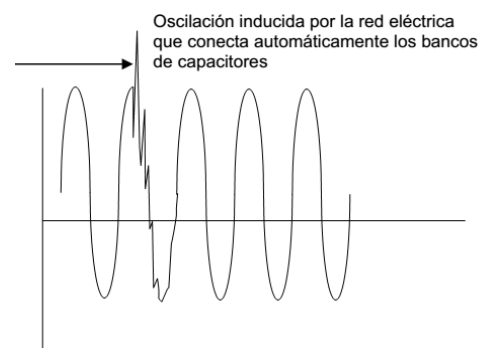


Fig.3. Transitorio oscilatorio

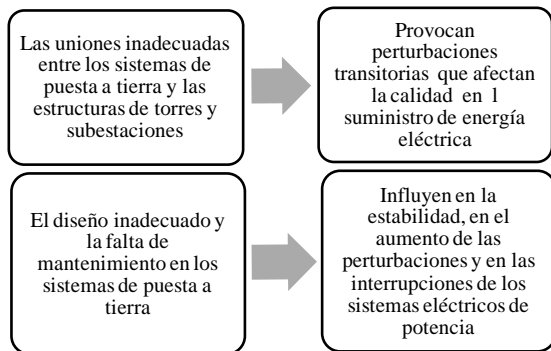


Fig. 4. Relación de los sistemas de puesta a tierra y calidad de energía

4 Caso de Estudio: Línea Tigre I-Barbacoa I

4.1. Características Técnicas

Como caso de estudio se analizó la línea Tigre I-Barbacoa I, perteneciente al estado Anzoátegui, es una línea de 230 kV doble terna, con 1 conductor por fase y dos cables de guarda, tiene una longitud de 142 km y está conformada por 368 torres. Un resumen de las características técnicas de la línea Tigre I-Barbacoa I a 230 kV se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características Técnicas de la Línea Tigre I-Barbacoa I

Longitud de la Línea	142 km
Tensión Nominal	230 kV
Número de Torres	368
Número de Conductores por Fase	1
Conductor de Potencia	ACSR 26/7 795 MCM
Número de Cables de Guarda	2
Cable de Guarda	OPGW de 95mm ² /Diámetro 11mm
Capacidad Térmica	Normal: 311 MVA
	Emergencia: 394 MVA
Tipo de Torre	Estructura Metálica
Altura Mínima del Conductor a Tierra	17 m
Transpuesta	Si

La cadena de aisladores instaladas en las torres de la línea Tigre I-Barbacoa I están compuestas por aisladores antinieblas de porcelana, tipo rotula y bola. Cada aislador posee un diámetro de 292mm, longitud de 146mm y distancia de fuga de 432mm. Un parámetro crítico para modelar las cadenas de aisladores es el parámetro del sobrevoltaje crítico (CFO = Critical Flash Over Voltage). Este valor de tensión está definido como el valor de cresta de un impulso estándar para el cual el aislador exhibe el 50% de probabilidad de falla. En la tabla 2 se muestra las características de la cadena de aisladores de la línea.

Tabla 2. Características de la cadena de aisladores de la línea Tigre I-Barbacoa I

Aisladores	Tipo	Nº de Platos	CFO (V)
Suspensión	LAPP 1988 H160B	16	1450
Amarre	LAPP 1988 H160B	18	1450

4.2. Análisis de las Fallas

En la línea Tigre I-Barbacoa I de acuerdo al historial de fallas del Centro de Transmisión Oriental CORPOELEC, entre los años 2007 y 2012 se presentaron un total de 72 fallas distribuidas como se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Fallas en línea Tigre I-Barbacoa I

Causa de la Falla.	Número de Fallas
Descargas atmosférica	20
Vegetación	23
Desconocidas	18
Equipo	7
Incendios debajo de la línea	4
Fallas totales	72

De las fallas presentadas el 32% se debe a la alta vegetación a lo largo de toda la línea, seguidamente de las descargas atmosféricas que representan el 28% y las fallas desconocidas que representan el 25%. En la figura 5 se muestra la distribución porcentual de las fallas, donde se observa que las fallas están asociadas a corrientes de cortocircuito, eventos transitorios impulsivos e interrupciones de tipo instantánea a sostenida.

Las fallas por alta vegetación, se producen por el acercamiento de las líneas a árboles o ramas, donde la mayoría de las veces el despeje de la falla es inmediato, por lo que el vencimiento de la rigidez dieléctrica es temporal.

Las descargas atmosféricas, producen fallas que son más difíciles de predecir y son las que tienen mayor consecuencia al producirse debido a las sobretensiones y altos valores de la corriente de cresta de las descargas. No todas las descargas atmosféricas producen fallas en las líneas, esto solamente ocurre en caso de presentarse algunos problemas técnicos como: errores de apantallamiento en la línea, resistencia de puesta a tierra de las torres mayor a 20Ω o fallas en el aislamiento de la línea.

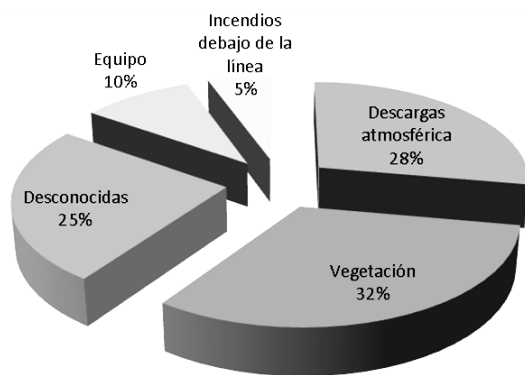


Fig. 5. Porcentaje de fallas en línea Tigre I-Barbacoa I (nota blanco y negro)

Con el fin de calcular el número de salidas por año de una forma aproximada, se tomaron en cuenta principalmente los eventos registrados en el registro de fallas de CORPOELEC como desconocida, descarga atmosférica y vegetación. En la tabla 4 se muestra el número de salidas por año.

Tabla 4. Número de salidas de la línea por año

Años	Número de salidas
2007	13
2008	11
2009	9
2010	19
2011	6
2012	3

4.3. Mediciones de Resistencia de Puesta a Tierra

Los valores de la resistencia de puesta a tierra a 30 torres de las 368 se obtuvieron mediante el método de caída de potencial (IEEE 80-2000, 2000). El 30% de las resistencias de puesta a tierra medidas generaron valores mayores a 20Ω , lo cual sobrepasa lo establecido por la IEEE 80-2000, que indica que debe ser inferior a 20Ω . Entre las torres que presentan valores mayores a 20Ω se destacan las siguientes torres 29, 56, 76, 122, 161, 329, 328A, 327A y 326A.

4.4. Modelado de la Línea

Para el modelado de la línea se utilizó el programa T-FLASH mediante un modelo detallado de la línea considerando sus parámetros básicos de diseño (EPRI, 2002). El programa contempla un algoritmo lógico basado en la metodología EPRI para la representación del modelo electro geométrico de la línea y del modelo de ionización del terreno.

En el modelo se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

144 torres de las 368 de la línea ya que solamente se disponía de la descripción detallada (progresiva, cotas, vanos, flecha, geometría de las torres) de estas torres.

Se asumió un valor de resistencia de puesta a tierra de 91Ω como promedio.

En la tabla 5 se muestran algunos de los datos necesarios para el modelado de la línea, el tipo de puesta a tierra de las torres es radial, contienen 4 contrapesos con una longitud de 25 m, el CFO de los aisladores es de 1450 kV, la resistencia de puesta a tierra utilizada para estas 9 torres es de 91Ω mayor a 20Ω y un tipo de suelo arenoso. Además, el tipo de conductor para estas líneas es ACSR 795 MCM.

Tabla 5. Datos necesarios para el modelado de la línea

Torre	Progresiva	Vano (m)	Flecha (m)	Flecha cable guarda
326A	0000,00	247,89	4,13	3,67
327A	247,89	332,95	7,45	6,62
328A	580,84	367,05	9,05	8,04
329	2020,48	389,31	10,18	9,04
161	947,89	338,01	7,68	6,82
122	2020,48	389,31	10,18	9,04
29	20070,5	430,03	12,43	11,0
56	33600,67	307,09	6,34	5,60
76	37583,32	395,18	10,49	9,30

Los conductores fueron modelados de la manera en que se encuentran físicamente posicionados en las torres de transmisión y considerando sus características eléctricas. En la figura 6, se muestra la geometría y dimensiones de las torres, utilizadas para el modelado.

Para simular el efecto de las descargas atmosféricas sobre la línea se requiere la densidad de descargas atmosféricas a tierra que corresponde al número de descargas por km y por año. En este sentido, con la finalidad de aproximar de mejor forma el comportamiento real de la línea se incluyeron en el modelo el historial estadístico obtenido entre los años 2007-2012, donde se presentaron 3,3 fallas por descargas atmosféricas al año y 2,3 salidas al año por cada 100 km de línea.

4.5. Análisis del Comportamiento de la Línea

Los resultados generados de la simulación muestran que la línea presenta un promedio de 3,6 salidas al año lo que es similar a la realidad, ya que según el historial de fallas de CORPOELEC la línea tuvo un promedio de 3,3 salidas al año por descargas atmosféricas entre los años 2007-2012.

De acuerdo a los resultados de la simulación, el 98,44% de las salidas se deben a descargas retroactivas lo cual es ocasionado por los altos valores de resistencia de puesta a tierra en las diferentes torres de la línea, y el 1,56

% de las salidas/año de la línea corresponden a impactos directos por descargas atmosféricas a los conductores de fase lo que demuestra que la línea posee un buen apantallamiento a través del cable de guarda.

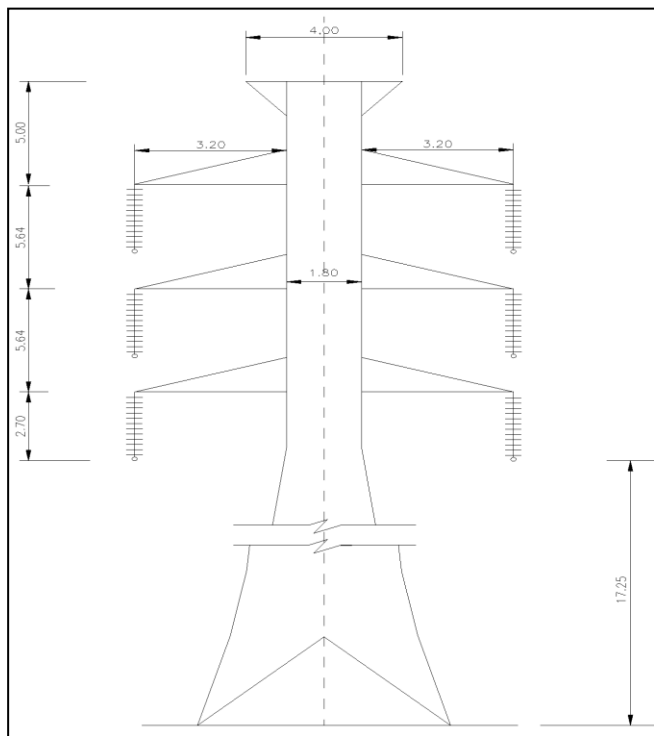


Fig. 6. Geometría y dimensiones de las torres utilizadas para el modelado de la línea

Con base en la simulación anterior y debido a que el 98,44% de las salidas de la línea se deben a descargas retroactivas y que la línea cuenta con un buen apantallamiento por parte del cable de guarda solo se evaluó el comportamiento de la línea cuando una descarga atmosférica impacta en la cima y en la mitad del vano.

En las figuras 7 y 8 se muestra que el voltaje a través de la cadena de aisladores después de 1 μ s de haber impactado la descarga atmosférica alcanza valores superiores a los 3500 kV, sin embargo, esta sobretensión no logra vencer la tensión de soporte de la cadena de aisladores de los conductores de fase 1 y fase 2. Se destaca que en esta torre 56 se obtuvo un valor de resistencia de puesta a tierra de 161 Ω .

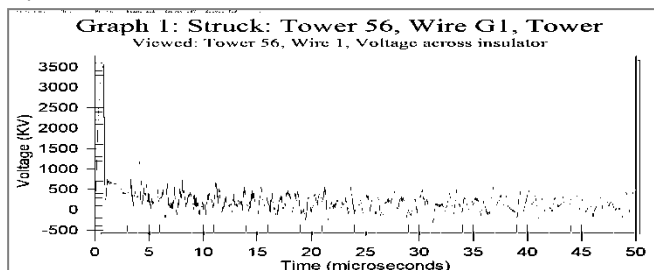


Fig. 7. Respuesta de la cadena de aisladores de la fase 1

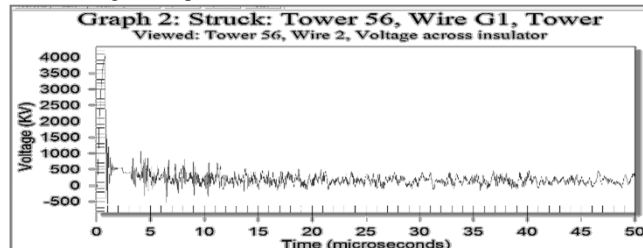


Fig. 8. Respuesta de la cadena de aisladores de la fase 2

En la figura 9 se observa como después de 1 μ s de haber ocurrido la descarga atmosférica el voltaje a través de la cadena de aisladores de la fase 3 es superior a los 4000 kV y luego cae rápidamente a cero, lo que significa que la sobretensión originada por la descarga venció la tensión de aguante de la cadena de aisladores produciendo así un arco o flameo inverso entre el conductor de fase y la estructura que pudiera ocasionar la salida de servicio de la línea.

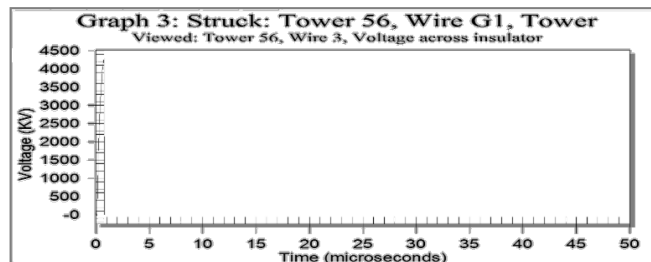


Fig. 9. Respuesta de la cadena de aisladores de la fase 3

En las figuras 10, 11 y 12 se muestra que el voltaje a través de la cadena de aisladores al pasar 0,6 μ s de haber impactado la descarga atmosférica en la torre 103 alcanza valores superiores a los 2000 kV, luego la señal se atenúa y alcanza valores que oscilan entre 400 y 300 kV, sin embargo esta sobretensión no logra vencer la tensión de soporte de la cadena de aisladores de los conductores de fase 1, fase 2 y fase 3. Se destaca que en esta torre se obtuvo un valor de resistencia de puesta a tierra de 19 Ω .

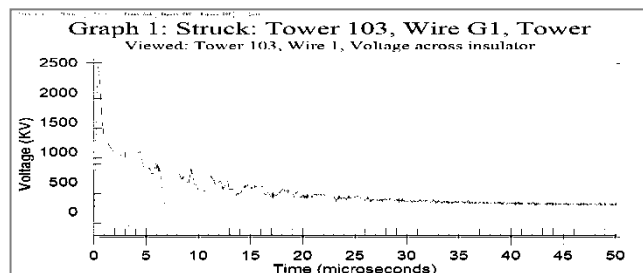


Fig. 10. Respuesta de la cadena de aisladores de la fase 1

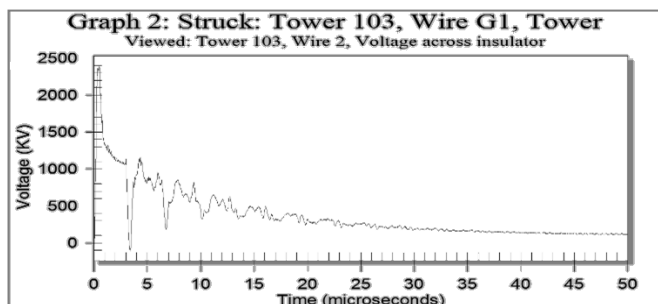


Fig. 11. Respuesta de la cadena de aisladores de la fase 2

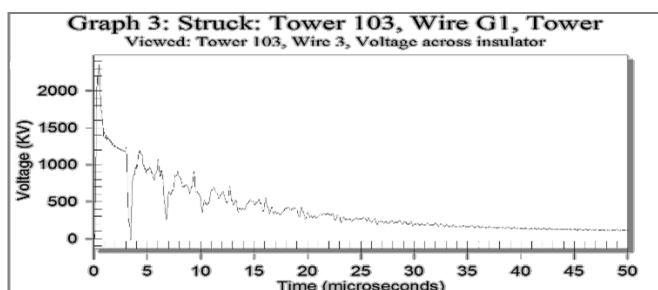


Fig. 12. Respuesta de la cadena de aisladores de la fase 3

5 Resultados y Discusión

Cuando la descarga atmosférica impacta en la cima de la torre 56, la cual presenta una resistencia de puesta a tierra igual a 161Ω al transcurrir $1 \mu s$ a través de la cadena de aisladores de la fase 1 y fase 2 la sobretensión ocasionada por la descarga alcanza valores superiores a los 3500 kV que no sobrepasan la tensión de aguante de la cadena de aisladores de estas fases. Sin embargo, en la cadena de aisladores de la fase 3 al cabo de $1 \mu s$ de haber impactado la descarga a través de la cadena de aisladores de esta fase la sobretensión alcanza valores superiores a los 4000 kV produciendo un arco o flameo entre el conductor de fase 3 y la torre que podría ocasionar una falla en la línea.

Cuando la descarga impacta en la cima de la torre 92, la cual presenta una resistencia de puesta a tierra de 93Ω y transcurrir $1 \mu s$ a través de la cadena de aisladores de la fase 1 y fase 2 se origina una sobretensión que alcanza valores superiores a los 2500 kV, luego la señal se atenúa y se estabiliza entre 700 y 600 kV por lo que la sobretensión no genera en estas fases ninguna amenaza para el buen funcionamiento de la línea. Sin embargo, a través de la cadena de aisladores de la fase 3 la sobretensión alcanza valores superiores a 3000 kV y luego cae a cero voltios lo que significa que en esta fase se ha producido un arco o flameo entre el conductor de fase y la torre que podría ocasionar la salida de servicio de la línea.

Cuando la descarga impacta tanto en la cima o en la mitad del vano de la torre 103, la cual presenta un valor de resistencia de puesta a tierra igual a 19Ω , se observó que a

través de la cadena de aisladores de las fase 1, fase 2 y fase 3 las sobretensiones originadas por la descarga no producen ningún tipo de inconvenientes que puedan poner en peligro el buen funcionamiento de la línea.

6 Conclusiones

Las fallas más comunes presentadas por la línea entre los años 2007-2012 se debieron a fallas a tierra por la alta vegetación en las cercanías de la subestación Barbacoa I, y a las descargas atmosféricas a lo largo de la línea, las cuales representan el 32% y 28% respectivamente de las fallas totales de la línea.

Resistencias de puesta a tierra menor a 20Ω y descargas atmosféricas mayores a 20 kA, originan sobretensiones que no producen ningún tipo de inconvenientes que puedan poner en peligro el buen funcionamiento de la línea.

Resistencias de puesta a tierra mayor a 20Ω y descargas atmosféricas mayores a 20 kA, originan sobretensiones que superan la tensión de aguante de la línea provocando un arco o flameo entre el conductor de fase y la torre que podría ocasionar la salida de servicio de la línea.

Los sistemas de puesta a tierra deben ser capaces de tolerar corrientes de cortocircuito durante el tiempo transcurrido entre el momento de la falla y la actuación de las protecciones, sin deteriorar sus propiedades mecánicas ni eléctricas. También deben ser capaces de drenar corrientes a tierra, provenientes de eventos transitorios, tales como, descargas atmosféricas o sobretensiones, sin producir diferencias de potencial significativas que puedan ocasionar el deterioro prematuro de equipos y sistemas eléctricos.

La simulación realizada se ajusta a los valores reales, al obtener un promedio de 3,6 salidas al año lo que es similar a la realidad, ya que según el historial de fallas de CORPOELEC la línea tuvo un promedio de 3,3 salidas/año por descargas atmosféricas entre los años 2007-2012.

Referencias

- Abreu A, 2005. Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución. ENELVEN. Venezuela.
- Castro, M., Suárez, S., De Armas, F. y Dorta S. M., 2006. Niveles de aterramiento y rayo: simulación de sus efectos sobre el consumidor. Energética Vol. XXVII, pp 52-58.
- EPRI (Electric Power research Institute), 2002. T-FLASH Transmission Line Lightning protection" Software and documentation, version 4.0.
- Gallego Y, Valcárcel A, Limonte A y Mariño A, 2014. Modelación de sistemas de puesta a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias. Ingeniería Energética Vol. XXXV, No. 3, pp. 183 - 192, ISSN 1815-5901.
- Gómez H, Velilla E, Moreno G y Valencia J, 2006. Respuestas Transitorias de las puestas a tierra en la protección contra rayos. Software GTIERRAS. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia., Medellín, Colombia N.º 36. pp. 21-32.

Gastón H, Venegas V y Melgoza E, 2008. Diseño y simulación de una red de tierras para una subestación tipo GIS. IEEE Latin America Transactions, Vol. 6, No. 2, pp. 137-140.

IEC Standard 62305-3 y 62305-4, 2010. Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and lifehazard - Part 4: Electrical and electronic systems within structures.

IEEE Standard 1100, 1992. Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment.

IEEE Standard 1159, 1995. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality a Status Update.

IEEE 1410, 1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electrical Power Overhead Distribution lines, p, 39, New York, December 1997.

Malagón G, Giraldo W, Ordoñez G, y Chacón J, 2013, Prácticas CEM enfocadas en la mitigación del Impulso Electromagnético del Rayo (IER): Earthing and Bonding; un enfoque de la IEC 62305. Tecnología en Marcha. Vol. 26, N° 4, pp. 13-25.

Montaña G, Duarte O, Sarmiento A, Marín M, y Torres O, 2006. UN_PAT: Programa para el cálculo de potenciales transitorios en puestas a tierra. Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia, Vol. 26, No. 3, pp. 143-148.

Sheshyekani K, Ghadimi A, Karami H, Sadeghi S, Moini R, Rachidi F, y Paolone M, 2010, The Impact of the Grounding System on the Lightning Performance of Transmission Lines: a Sensitivity Analysis”. 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010 (Cagliari, Italy), No. EPFL-CONF-15249, pp. 1139-1-1139-6.

Sverak, J., 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std. 80-2000.

Téllez E, 2007, Programa de Ahorro de Energía: Calidad de la Energía, ponencia presentada en Cuarto Seminario Nacional de Watergy México. Disponible en: <http://watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Calidad%20de%20la%20Energia.pdf>. Enero, 2015.

Vásquez C, Suárez O y Blanco M, 2004, Alternativas para disminuir las interrupciones del servicio eléctrico por descargas atmosféricas en Barquisimeto. Ingeniería Energética, Vol. XXV No. 2, pp. 46-50.

Villa A y Carrasco G, 2001, Simulación con ATP de pararrayos para las líneas a 115 y 400 kV de EDELCA. Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 22 No. 1, pp. 10-16.

Recibido: 25 de marzo de 2016

Aceptado: 10 de enero de 2017

Mercado Polo, Verena: *Ingeniero Electricista, Universidad del Norte (Colombia) en 1993, reválida del título en la Universidad de Oriente (Venezuela) en 2005. Especialista en Automatización e Informática Industrial, Universidad de Oriente. Maestría en Ingeniería Eléctrica, Mención Auto-*

matización e Informática Industrial (Fase de elaboración tesis). Profesor-Investigador en Pregrado y Postgrado en Universidades Nacionales e Internacionales. Experiencia en Sistemas de Puesta a Tierra, calidad de la energía, mantenimiento, confiabilidad y automatización de sistemas eléctricos de Potencia. Universidad de Oriente, Departamento de Electricidad. Universidad de Oriente, Vía Alterna, Barcelona. Puerto La Cruz. Estado Anzoátegui, Venezuela.

Peña, José Bernardo: *Ingeniero electricista, Magister en Gerencia con orientación a proyectos tecnológicos (Telecomunicaciones) y Especialización en Gerencia de Ingeniería de Mantenimiento. Profesor-Investigador de pregrado (UDO-1996-actual) y postgrado (UDO y Universidades Nacionales como invitado) en el área de telecomunicaciones y proyectos. Experiencia en campo del impacto de la calidad de la energía en la disponibilidad, confiabilidad en telecomunicaciones y centro de datos. Presidente del Capítulo de Comunicaciones y Microondas del IEEE (Institute Electronic Electric Engineer), Sección Venezuela (COM19/MTT17). Universidad de Oriente, Vía Alterna, Barcelona. Puerto La Cruz. Estado Anzoátegui, Venezuela. Correo electrónico: penajb@gmail.com*

Pacheco, Luis: *Ingeniero electricista, Universidad de Oriente (Venezuela) en 2013. Universidad de Oriente, Vía Alterna, Barcelona. Puerto La Cruz. Estado Anzoátegui, Venezuela. Correo electrónico: pachecoluisma@gmail.com*