



## **Medición de la resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión con baja y alta frecuencia**

**Favio Casas Ospina, Alán Duque, Humberto Berni y Milthon Martínez**

**Segeléctrica Paraguay**

**Paraguay**

### **RESUMEN**

Este trabajo presenta un caso práctico de medición de la resistencia de Puesta a Tierra (PAT) en las torres de transmisión (TR) de la línea doble terna correspondiente a los circuitos 8 y 9 de la ANDE, llevado a cabo en la localidad de Dr. Juan Eulogio Estigarribia (ex Campo 9), Departamento de Caaguazú - Paraguay. Para las mediciones se utilizaron telurómetros de baja y alta frecuencia, demostrando los valores obtenidos y las precauciones y recomendaciones a ser tenidas en cuenta para adecuar dichas mediciones a las recomendaciones de la Norma IEEE 81 “Medición de Resistencia de Puesta a Tierra”. Se demuestran los resultados que se obtuvieron con cada instrumento y se evalúa el diseño de la puesta a tierra (PAT).

### **PALABRAS CLAVES**

Puesta a Tierra, Sistema de Puesta a Tierra, diseño y modelamiento, Resistencia de Puesta a Tierra, mediciones, normas IEEE Standard 81, baja y alta frecuencia, línea de transmisión, torres de transmisión.

### **INTRODUCCIÓN**

En nuestro país, para el diseño de la PAT en torres de transmisión (TR), a veces por la premura del tiempo, se establecen modelos sin realizar un completo análisis de la resistividad del suelo en el lugar donde será construida la torre de TR.

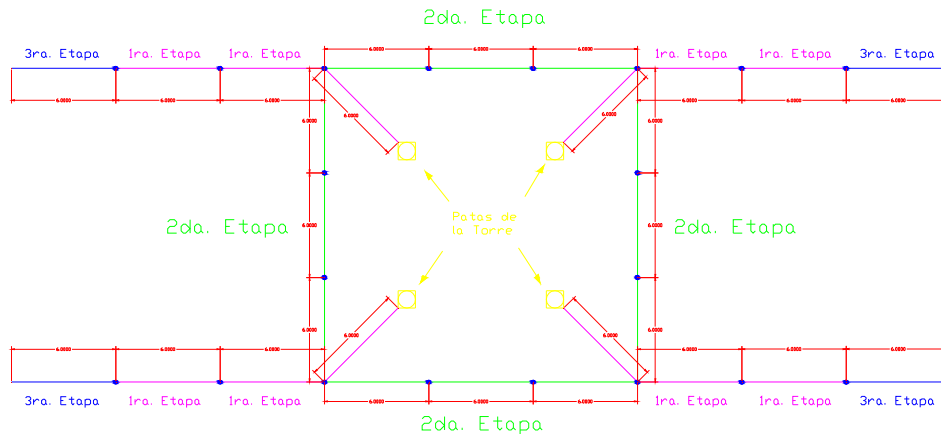
Existen métodos que van implementando por etapas la construcción de la PAT en torres de TR, en este estudio analizamos profundamente los diseños recomendados y se su desempeño en el terreno.

Hoy en día existen fórmulas prácticas que nos permiten diseñar las longitudes de los contrapesos, estimando ya el valor de la resistencia de PAT a ser esperada.

Las mediciones realizadas demuestran los valores obtenidos y finalmente se dan algunas consideraciones sobre el diseño.

## DESARROLLO

### 1. DISEÑO ORIGINAL DE PUESTA A TIERRA DE LA TORRE EVALUADA



#### Referencias

- Planchuela de 35x4 mm de acero galvanizado
  - 1ra. Etapa: 72 m de Planchuela
  - 2da. Etapa: 72 m de Planchuela
  - 3ra. Etapa: 24 m de Planchuela
- DBS.: Las Planchelas están unidas entre sí con dos bulones

**Figura 1: Esquema del diseño original de puesta a tierra de la torre**

La principal función de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas, eso hace que en todo diseño, se fije una resistencia objetivo. Por tanto, los valores que recomendamos a continuación surgen de la experiencia cotidiana, sin que necesariamente obedezcan a una norma específica o a una meta obligatoria.

Tabla I: Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

APLICACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA	VALOR MÁXIMO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras de líneas de transmisión.	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión en poste.	10 $\Omega$
Subestaciones de media tensión de uso interior.	10 $\Omega$
Protección contra rayos.	4 $\Omega$
Neutro de acometida en baja tensión.	25 $\Omega$
Descargas electrostáticas.	25 $\Omega$
Equipos electrónicos sensibles.	5 $\Omega$

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Septiembre de 2012

Todo diseño de puesta a tierra debe asegurar, hasta donde la ingeniería lo permita, limitar las elevaciones de potenciales en el momento de falla, en la zona de influencia. Si se logra despejar la falla en muy corto tiempo, se reducen las probabilidades de lesiones o daños.

En una puesta a tierra no sólo encontramos una resistencia sino también una inductancia y una capacitancia que igualmente influyen en el paso de la corriente por la tierra; por lo tanto, no deberíamos hablar de una resistencia sino de una impedancia. Para bajas frecuencias, bajas corrientes y valores de resistividad del suelo no muy elevados, son despreciables los efectos capacitivos y de ionización del suelo y él mismo se comporta prácticamente como una resistencia. En el caso de altas frecuencias, es necesario considerar el efecto capacitivo, principalmente en suelos de altas resistividades. Ondas de tipo impulso, como las de los rayos, sufren igualmente la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones al penetrar el suelo.

## 2. MEDICIONES REALIZADAS

- Estudio de resistividad
- Modelamiento y estratificación del terreno en capas
- Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra y análisis del comportamiento
- Medición de equipotencialidad entre torres adyacentes
- Medición de campo eléctrico
- Medición de campo magnético
- Interpretación de resultados
- Edición e impresión de informe

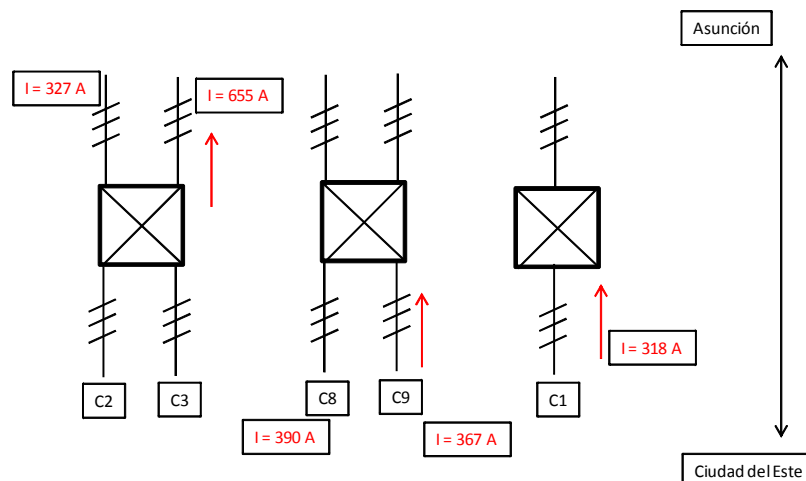


Figura 2: Esquema de las mediciones de campo eléctrico

## 3. PERSONAL Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para el desarrollo de las actividades se designó un grupo de trabajo compuesto por ingenieros especialistas y técnico auxiliares.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Septiembre de 2012

Relación de los recursos físicos utilizados:

- Telurómetro de 1470 Hz.
- Telurómetro de 25 kHz.
- Medidor de campo eléctrico.
- Medidor de campo magnético.
- Osciloscopio.
- Fuente de corriente continua, tensión variable.
- Multímetros (voltímetro y amperímetro).
- Cámara fotográfica y filmadora.
- Computadora y/o notebook.
- Generador.
- Software para modelamiento.

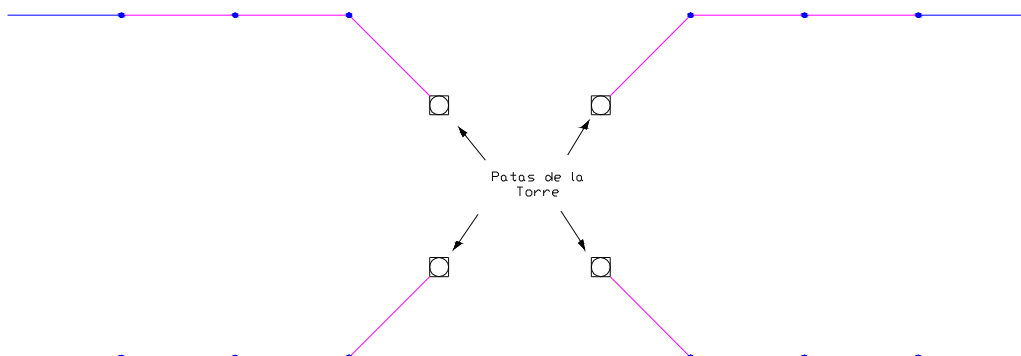
#### 4. RESULTADOS ESPERADOS

El valor de la resistencia de puesta a tierra esperado y exigido por la ANDE es de máximo 10 ohmios ( $10 \Omega$ ), pero con las mediciones realizadas se obtuvieron valores muy por encima de los esperado.

Estos valores altos de resistencia de puesta a tierra se deben a muchos factores, entre los cuales se pueden mencionar:

- La resistividad aparente del terreno es alta: el valor de resistividad promedio ( $729,74 \Omega.m$ ) se encuentra entre  $500 \Omega.m$  y  $1000 \Omega.m$ .
- Se presentan fuertes interferencias debido a las características especiales de este corredor electromagnético formado por la confluencia de las tres líneas de transmisión.
- La configuración de la malla de puesta a tierra quizás no es la más apropiada para este tipo de aplicaciones.

#### 5. DISEÑO PROPUESTO PARA LAS PAT DE TORRES DE TR



**Figura 3: Puesta a Tierra propuesta para las torres de transmisión**

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Septiembre de 2012

Pasos para lograr excelentes puestas a tierra

- Determinación de los parámetros
- Diseño
- Análisis del comportamiento
- Topología
- Materiales y cantidades de obra
- Ejecución de obra
- Mediciones de comprobación
- Detalles finales

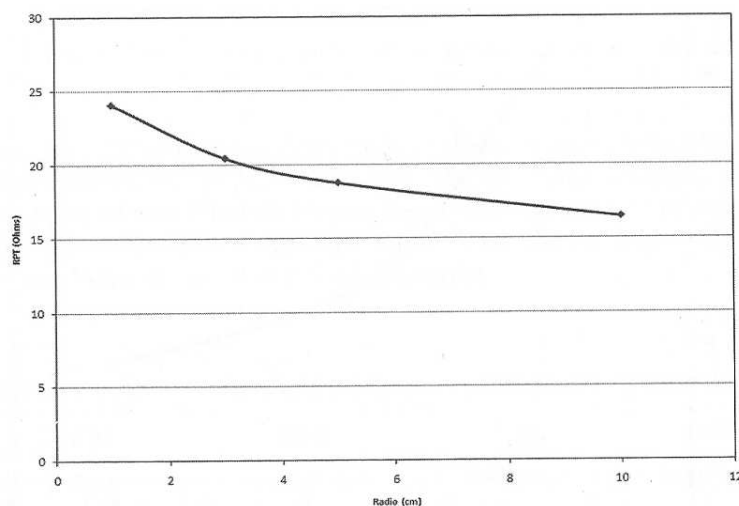
6. PARÁMETROS QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PUESTAS A TIERRA

A continuación se presentan un análisis resumido de parámetros que afectan el comportamiento de las puestas a tierra.

6.1 Influencia del modelo del terreno (análisis en baja frecuencia)

- $\rho$  = Resistividad. Se hace modelamiento del terreno homogéneo y en dos capas.
- Puesta a tierra conformada por una varilla de 2,4 m de 5/8" enterrada a 0,4 m de profundidad.
- Se calcula la resistencia de puesta a tierra para los dos tipos de terreno.
- Se llega a un sobredimensionamiento del sistema al usar un modelo del terreno homogéneo.

6.2 Influencia del radio del conductor en la Resistencia de PAT (análisis en baja frecuencia)

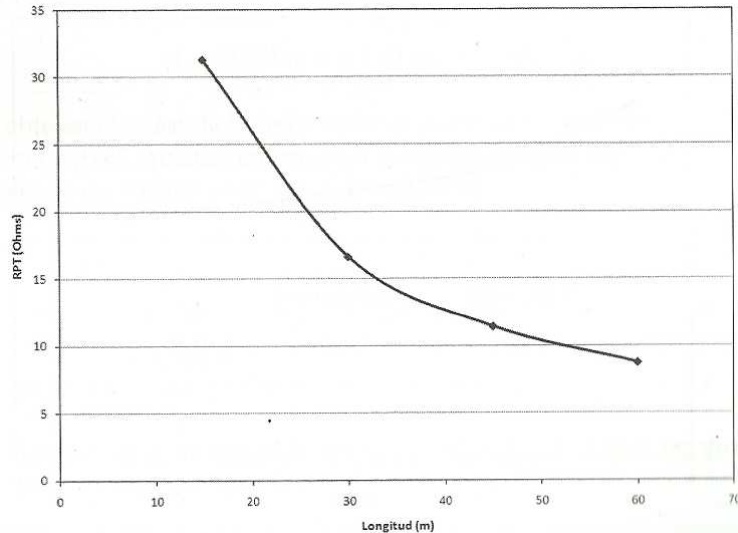


**Figura 4: Variación de la resistencia de puesta a tierra con el radio del conductor**

- Se toma el modelo del terreno en dos capas.
- Se varían los radios de un conductor horizontal de 20 m de largo enterrado a 0,4 m de profundidad.
- Se calculan los valores de resistencia de puesta a tierra para cada radio del conductor.
- El radio aumenta 10 veces, pero la resistencia sólo disminuye un 32%.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Septiembre de 2012

6.3 Influencia de la longitud en la Resistencia de PAT (análisis en baja frecuencia)



**Figura 5: Variación de la resistencia de PAT con la longitud del conductor**

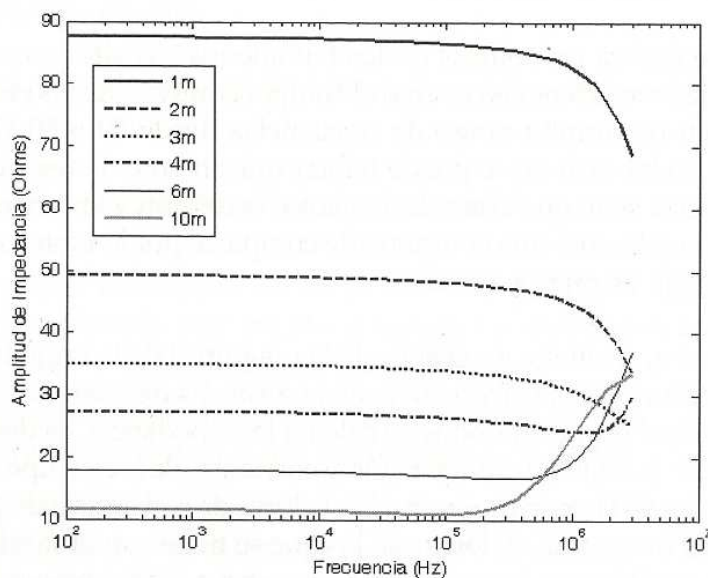
- Es muy extensa la lista de las variables que se utilizan en este tipo de diseños.
- Se pasará la lista de las variables más relevantes en el desarrollo de la presentación final.

6.4 Efecto de la configuración de la malla de PAT (análisis en baja frecuencia)

6.5 Recomendaciones del análisis de estado estable (en baja frecuencia)

6.6 Impedancia de puesta a tierra (análisis transitorio : alta frecuencia)

6.6.1 Impedancia de varillas



**Figura 6: Magnitud de la impedancia en función de la longitud de la varilla**

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Septiembre de 2012

6.6.2 Impedancia de contrapesos

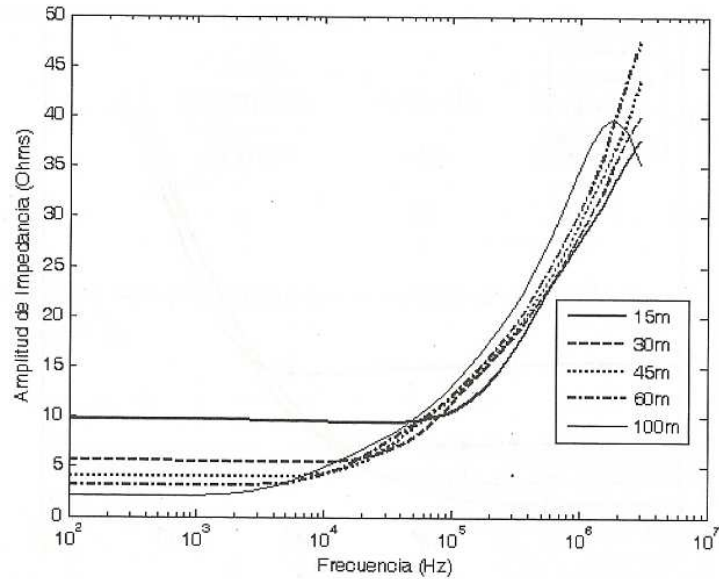


Figura 7: Magnitud de la impedancia en función de la longitud del contrapeso

6.6.3 Impedancia de mallas de tierra

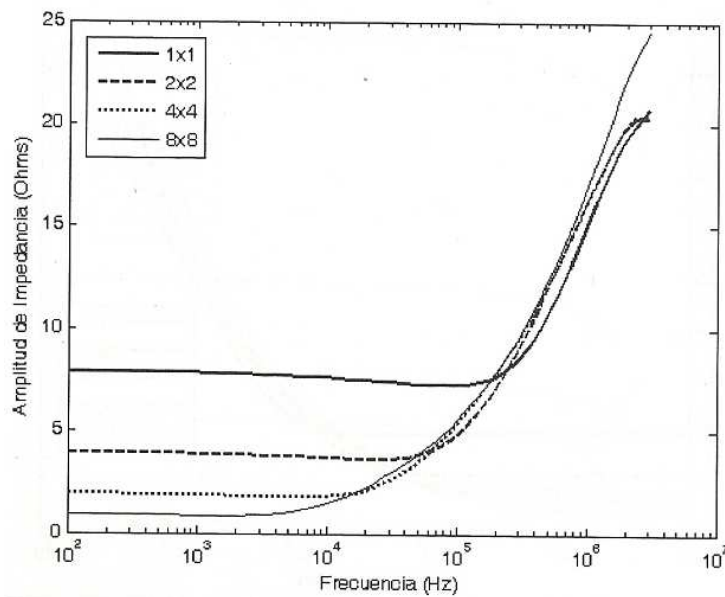
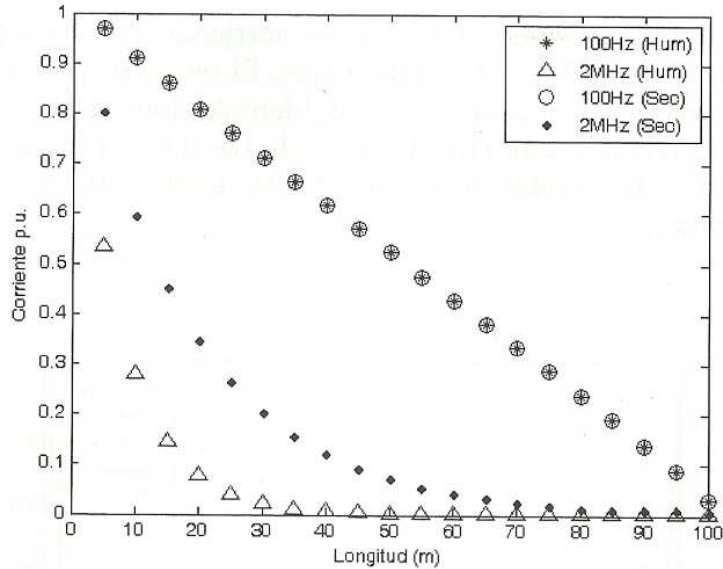


Figura 8: Magnitud de la impedancia para diferentes tamaños de malla

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Septiembre de 2012

6.7 Máxima longitud de conductores (análisis transitorio : alta frecuencia)

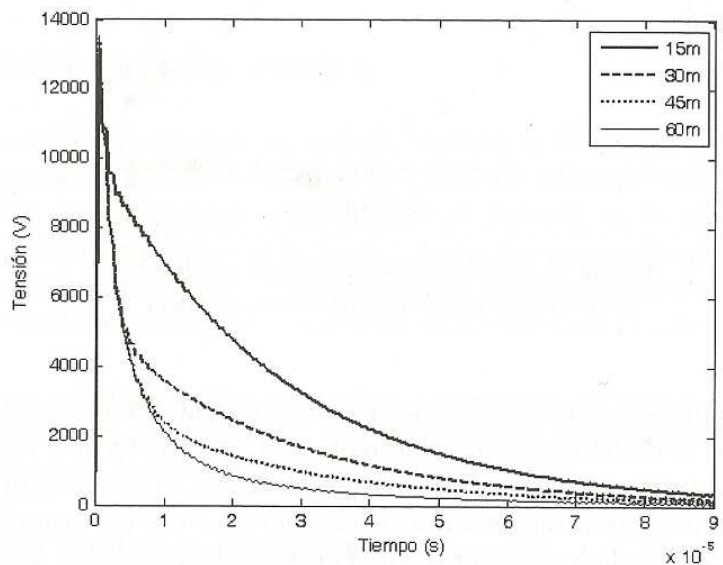
Longitud efectiva de contrapesos



**Figura 9: Distribución de corrientes a lo largo de un conductor en función de las frecuencia**

6.8 Tensiones transitorias

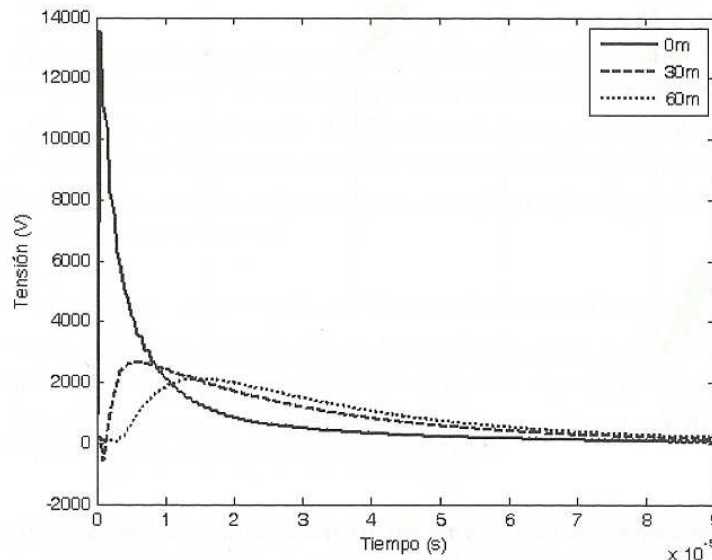
6.8.1 Tensión en contrapesos



**Figura 10: Magnitud de tensión en el punto de inyección para diferentes longitudes de contrapeso**



### 6.8.2 Tensión en contrapeso de 60 m



**Figura 11: Magnitud de tensión en diferentes puntos a lo largo de un contrapeso de 60 m**

### 6.9 Recomendaciones del análisis transitorio (alta frecuencia)

Se debe tener presente que el criterio fundamental para garantizar la seguridad de los seres humanos es la máxima corriente que pueden soportar, debida a las tensiones de paso, de toque o transferidas y no el valor de resistencia de puesta a tierra tomado aisladamente. Sin embargo, un bajo valor de la resistencia de puesta a tierra es siempre deseable para disminuir la máxima elevación de potencial de tierra (GPR).

## 7. CONCLUSIONES

Se pueden mencionar inicialmente las siguientes conclusiones:

- No se debe diseñar una puesta a tierra sin haber realizado el estudio de resistividad del suelo
- En el diseño de las puestas a tierra se deben tener en cuenta las tensiones de paso y de toque máximas tolerables, considerando la corriente de falla a tierra y el tiempo de despeje de la falla
- Después sí se tiene en cuenta el valor de resistencia óhmica de la puesta a tierra
- Considerando la vida útil de los componentes de la malla de puesta a tierra, se deben realizar los mantenimientos periódicos recomendados
- Realizar las conexiones equipotenciales, considerando que la puesta a tierra y las redes equipotenciales conforman lo que se denomina un Sistema de Puesta a Tierra (SPT)
- La puesta a tierra es para la seguridad de las personas
- El sistema de puesta a tierra es para seguridad de las personas y protección de los equipos
- Considerar la medición de resistencia de interconexión (de equipotencialidad)
- Se ha demostrado en algunos países que los armónicos aumentan las pérdidas del sistema al igual que una malla de puesta a tierra deficiente
- Evaluar económicamente lo que se paga por una puesta a tierra versus lo que se paga por los daños y consecuencias por la ausencia de un sistema eficiente de puesta a tierra
- La Puesta a Tierra es el soporte de la Seguridad Eléctrica

## 8. NORMAS Y DOCUMENTACIÓN DE APLICACIÓN

### 8.1 Puesta a tierra

- ANSI/IEEE Std 81 - 1983: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance.
- ANSI/UL 467 - 1984: Standard for Grounding and Bonding Equipment.
- ANSI/IEEE 32-1972 (R1990) Standard Requirements, Terminology and Test Procedures for Neutral Grounding Device (ANSI).
- BS 7430: 1998 Code of Practice for Earthing.
- EEB: LA 400, CS 500-2, CS 556, CS 557 y unificadas del sector eléctrico.
- IEC 61000-5-2 (1997-11) Electromagnetic compatibility part 5: Instalation and mitigation guidelines - section two: Earthing and cabling.
- IEC 61557-1/9 Electrical Safety in low Voltage Distribution Systems up to 1000 V a.c. and 1500 V d.c.- Equipment for Testing, Measuring of Protective Measures.
- IEC: 77B.WG2: Installation and mitigation guidelines: “Earthing and bonding”.
- IEEE STD 81-2 – 1991. Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding System.
- IEEE Standard 1048 - 1990: Guide for Protective Grounding of Power Lines.
- IEEE STD 367 - 1979: Guide for the Maximun Electric Power Station Ground Potencial Rise.
- KSC - STD-E-0012c-1994 Bonding and Grounding, Standard.
- ICONTEC: NTC 2050 (1999) Código Eléctrico Colombiano.
- ICONTEC: NTC 2206 - 1986 Electrotecnia. Equipo de Conexión y Puesta a Tierra.
- VDE 0141 (1964), Regulation for Earthings in A.C. Installations with Rated Voltage above 1 kV.

### 8.2 Libros

- Montaña, Johny. Teoría de Puestas a Tierra. Universidad del Norte. Ecoe Ediciones. 2011.
- Ramírez, José y Cano, Eduardo. Sistemas de Puestas a Tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 2010.
- Casas, Favio. Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica, Cuarta Edición. 2008.
- Torres Sánchez, Horacio. Protección contra Rayos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá - Icontec. 2008.