



## Introducción a la metodología del diseño de un Sistema de Puesta a Tierra para Subestaciones Eléctricas y técnicas de medición conforme a las normas internacionales IEEE 80, IEEE 81, IEC 479-1, IEC 60364

**F. CASAS**  
Seguridad Eléctrica Ltda.  
Colombia

**H.R. TOMASSONE**  
Enertec S.R.L.  
Paraguay

**H.M. BERNI\***  
Enertec S.R.L.  
Paraguay

**M.J. MARTÍNEZ**  
Enertec S.R.L.  
Paraguay

***Resumen** – La puesta a tierra es la base fundamental del sistema de puesta a tierra y su correcto dimensionamiento es imprescindible para garantizar la seguridad de las personas. Existe excelente literatura al respecto para el diseño de una puesta a tierra, por lo tanto antes de realizar la construcción es conveniente evitar la utilización de prácticas “tradicionales” sin bases normativas.*

*Este trabajo presenta una introducción sobre la metodología utilizada en el diseño, construcción, montaje y mantenimiento de sistemas de puesta a tierra (SPT) para Subestaciones Eléctricas, conforme a las normas técnicas internacionales IEEE Standard 80, IEC 479-1, IEC 60364, entre otras.*

*La presentación estará basada en las Memorias del excelentísimo **A. P. Sakis Meliopoulos**, Professor, GIT, conocido como el “Padre de la IEEE Std. 80”. El señor Meliopoulos desarrolló entre otros trabajos el denominado: “**Grounding System Design for Safety and Lightning Protection**”. La metodología empleada por Meliopoulos y posteriormente por la IEEE Std 80, es la base fundamental de los distintos paquetes de software actualmente utilizados para el modelamiento de sistemas de puesta a tierra*

*Finalmente, se describirán algunas técnicas de medición de resistencia de Puesta a Tierra (PAT) en las mismas subestaciones eléctricas, conforme a la IEEE Std 81.*

**Palabras clave:** Puesta a Tierra - Sistema de Puesta a Tierra - Subestación Eléctrica – Diseño – Modelamiento - Resistencia de Puesta a Tierra - Tensión de toque – Tensión de paso - GPR: máxima elevación del potencial de tierra – Equipotencialidad – Medición – Norma - IEEE 80 - IEEE 81.

## 1 INTRODUCCIÓN

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.

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.

---

\* Campos Cervera 5305 c/Avda. Rca. Argentina Of. 2-B Villa Morra Asunción – E-mail: humberto@enertec.com.py

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 $\Omega$

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 DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

### 2.1 Pasos para lograr excelentes puestas a tierra

#### 2.1.1 Determinación de los parámetros

- Determinar la resistencia de puesta a tierra objetivo.
- Establecer las tensiones de seguridad permitidas.
- Definir las temperaturas máxima y ambiente.
- Calcular la corriente de falla a tierra.
- Definir el máximo tiempo de despeje de la falla.
- Obtener valores del nivel de aislamiento (BIL) de equipos.
- Revisión de planos de la instalación.
- Determinar el área disponible.
- Estudio de la resistividad del terreno, permitividad y pH.
- Seleccionar parámetros de rayos.

#### 2.1.2 Diseño

- Recopilar las normas y programas necesarios.
- Definir geometría de la puesta a tierra.
- Elegir el tipo de electrodo y su cantidad.
- Definir profundidad de enterramiento del electrodo según el terreno.
- Escoger material y resistividad de la capa superficial.
- Definir tamaño de la retícula si es malla.
- Definir longitud de contrapesos.
- Calcular sección y longitud del conductor.
- Calcular resistencia de puesta a tierra.
- Ajustar valores.

- 2.1.3** Análisis del comportamiento
  - Calcular tensiones de seguridad.
  - Calcular el GPR (máxima tensión de la malla respecto a una tierra remota).
  - Evaluar comportamiento transitorio.
  - Confrontar valores respecto a las especificaciones.
  
- 2.1.4** Topología
  - Definir colas.
  - Ubicar cajas de inspección.
  - Definir rutas de cables.
  - Ubicar barras equipotenciales.
  - Interconectar con otras puestas a tierra.
  
- 2.1.5** Materiales y cantidades de obra
  - Hacer listado de materiales.
  - Valorar materiales básicos y accesorios, equipos, herramientas y mano de obra.
  - Elaborar el presupuesto definitivo.
  
- 2.1.6** Ejecución de obra
  - Nombrar el responsable directo.
  - Hacer cronograma.
  - Construir la puesta a tierra.
  - Levantar planos de lo construido o “As Built”.
  
- 2.1.7** Mediciones de comprobación
  - De resistencia de puesta a tierra.
  - De tensión de paso.
  - De tensión de contacto (toque).
  - De equipotencialidad.
  
- 2.1.8** Detalles finales
  - Terminar obra civil.
  - Señalizar.
  - Certificar la puesta a tierra.
  - Liquidar la obra.
  - Entregar garantías y memorias de cálculo.
  - Entregar plan de mantenimiento.

### **3 ACTIVIDADES A DESARROLLAR**

- 3.1** Estudio de Resistividad
  - Modelamiento y estratificación del terreno en capas.
  - Interpretación de resultados.
- 3.2** Diseño de la puesta a tierra y análisis del comportamiento
  - Evaluación de parámetros.
  - Cálculo de la resistencia de puesta a tierra con criterios de la IEEE-80.
  - Evaluación de tensiones de seguridad con criterios de la IEEE-80.
  - Distribución de tensiones superficiales con software para modelamiento.
- 3.3** Memorias de cálculo
- 3.4** Cantidades de obra
- 3.5** Especificación de materiales
- 3.6** Especificación de construcción
- 3.7** Elaboración de planos de diseño
- 3.8** Edición e impresión de informe

#### 4 DOCUMENTACIÓN REQUERIDA

Para la ejecución de los trabajos es necesario disponer de la siguiente información:

TABLA II. DOCUMENTOS O ARCHIVOS NECESARIOS  
PARA EL DISEÑO DE PUESTA A TIERRA

DESCRIPCIÓN	MEDIO
Parámetros: Resistividad del terreno, pH, corriente de falla monofásica a tierra, tiempo de despeje de la falla, temperatura ambiente, coordenadas geográficas.	Archivo magnético o impreso.
Plano con ubicación de área total disponible.	Archivo en Autocad o impreso.
Plano con distribución de equipos en patio.	Archivo en Autocad o impreso.

#### 5 PERSONAL Y EQUIPOS REQUERIDOS

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

Los recursos físicos mínimos requeridos son:

- Telurómetro de 1470 Hz.
- Cámara fotográfica y filmadora.
- Computadoras o notebook.
- Software para modelamiento.

#### 6 FALLA A TIERRA Y CORTOCIRCUITO

Son tantas las veces que hemos visto confundir estos dos tipos de fallas, específicamente calculando mallas de puesta a tierra con corrientes de cortocircuito, que queremos retomar apuntes teóricos que ayuden a recordar la diferencia.

Se produce un cortocircuito en un sistema de potencia cuando entran en contacto eléctrico de forma intencional o accidental dos o más conductores activos de un mismo circuito. Las ondas de corriente de cortocircuito en los sistemas industriales son principalmente de forma senoidal. Cuando ocurre este tipo de fallas, la mayor parte de la resistencia se elimina, quedando un circuito altamente inductivo. La corriente de cortocircuito es la suma de una componente continua y una componente alterna, La componente continua se da con su valor instantáneo, mientras que la componente alterna se da en valor eficaz. El valor que interesa de la corriente de cortocircuito es su amplitud, que puede determinarse conociendo el valor eficaz de la tensión de la fuente y el valor de la impedancia del circuito. (Ver Figura 1).



Figura 1. Cortocircuito en 230 kV

Una falla a tierra es una conexión no intencional entre partes conductoras de corriente del sistema y el suelo o terreno. Siendo la falla monofásica a tierra, la más importante. Si la falla es intermitente o se permite que continúe, el sistema puede estar expuesto a severas sobretensiones de entre seis y ocho veces la de fase y se tiene como una de las principales causas de incendios por electricidad por deterioro de la aislación de los conductores. (Ver Figura 2).



Figura 2. Falla a tierra en 230 kV

La falla a tierra es la más importante de las fallas asimétricas, además de ser la más frecuente en sistemas de media y alta tensión con punto neutro sólidamente conectado a tierra. Una conexión intencional a tierra de un sistema se hace para poder mantener el nivel de tensión dentro del aislamiento nominal y para permitir un pequeño flujo de corriente que permita detectar la ocurrencia de una falla a tierra. Los sistemas puestos a tierra sólidamente son mejores ya que facilitan la detección y búsqueda de fallas, infortunadamente no son capaces de limitar las corrientes de falla.

## 7 REGÍMENES DE CONEXIÓN A TIERRA

Todo sistema eléctrico está puesto a tierra, sin embargo, para que un equipo eléctrico funcione, no es requisito imprescindible que se tenga una puesta a tierra. Incluso para ciertos procesos es aconsejable que no se tenga referencia a tierra; pero los accidentes, la difícil detección de fallas, los incendios, el deterioro de la aislación, así como la quema de componentes electrónicos, hicieron que cada vez se reafirmara más el concepto de la obligatoriedad de tener sistemas de puesta a tierra.

Los regímenes aceptados tanto en la escuela norteamericana tradicional como a nivel de normalización de IEC son:

- Sistema flotante
- Con neutro artificial
- Con resistencia limitadora
- Con inductancia
- Sistema mixto
- Sólidamente puesto a tierra
- Sistema T-T
- Sistema TN-C
- Sistema TN-S
- Sistema TN-C-S
- Sistema I-T
- Sistema TN-S c.c.
- Sistema TN-C c.c.
- Sistema TN-C-S c.c.
- Sistema T-T c.c.

En la práctica actual de la ingeniería, en sistemas de 600 V o menos y en sistemas de más de 15 kV se emplea el régimen de conexión sólidamente puesto a tierra.

## 8 METODOLOGÍA IEEE 80

Por ser una norma de amplia difusión, se recopilan los pasos esenciales para diseñar una puesta a tierra según esta metodología.

### 8.1 Parámetros que se deben tener en cuenta en el diseño

- Condición geométrica: el diseño requiere que la malla de puesta a tierra sea cuadrada, rectangular o en forma de L.
- Capa superficial: este componente es prenda de garantía para la seguridad de las personas; se puede dejar un espaciamiento de aire o una capa de gravilla. En el caso de las subestaciones interiores con piso de concreto, con el fin de cumplir las normas de tensiones de seguridad, luego de instalar los equipos de patio se debe recubrir el piso de la subestación con materiales de goma o de vinilo.
- Conductor: se acostumbra a emplear como mínimo con sección transversal ( $A_c$ ) de 70 mm<sup>2</sup> de cobre de siete hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión

Los textos deberán escribirse con espaciamiento simple entre líneas, a una columna. Se recomienda no dejar sangrías en el comienzo de cada párrafo, para no desperdiciar espacios útiles para texto.

### 8.2 Constantes

- $\rho$  = Resistividad aparente del terreno tomado como un suelo uniforme [ $\Omega$ .m]
- $I$  = Corriente de falla monofásica a tierra en el secundario [kA]
- $I_o$  = Corriente de falla monofásica a tierra en el primario [A]
- $\tau_c$  = Tiempo de despeje de la falla [s]
- $K_f$  = Constante para diferentes materiales a diferentes temperaturas de fusión  $T_m$  y a una temperatura ambiente de 40 °C

### 8.3 Variables

- 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.

### 8.4 Tensiones de paso y de toque máximas tolerables

Para una persona de 50 kg

$$V_{\text{paso tolerable}} = \frac{(1000+6*C_s*\rho_s)*0,116}{\sqrt{\tau_c}} \quad [V] \quad (1)$$

$$V_{\text{toque tolerable}} = \frac{(100+1,5*C_s*\rho_s)*0,116}{\sqrt{\tau_c}} \quad [V] \quad (2)$$

Para una persona de 70 kg

$$V_{\text{paso tolerable}} = \frac{(1000+6*C_s*\rho_s)*0,157}{\sqrt{\tau_c}} \quad [V] \quad (3)$$

$$V_{\text{toque tolerable}} = \frac{(100+1,5*C_s*\rho_s)*0,157}{\sqrt{\tau_c}} \quad [V] \quad (4)$$

donde:

$C_s$  es un coeficiente en función del terreno y la capa superficial del mismo  
 $\rho_s$  es la resistividad aparente de la capa superficial (grava u otro material) [ $\Omega$ .m]

- 8.5 Determinación de la configuración inicial
- 8.6 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra en ohmios
- 8.7 Cálculo del máximo potencial de tierra (GPR)
- 8.8 Cálculo de tensión de malla en caso de falla
- 8.9 Cálculo de la tensión de paso en caso de falla
- 8.10 Cálculo de tensión de toque (o de contacto)

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).

La tensión máxima de toque aplicada al ser humano, que se acepta en cualquier punto de una instalación, está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla. La tensión máxima de toque no debe superar los valores dados en la siguiente tabla:

TABLA III. VALORES MÁXIMOS DE TENSIÓN DE TOQUE

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de toque admisible (valores en rms c.a.)
Mayor a dos segundos	50 voltios
500 milisegundos	80 voltios
400 milisegundos	100 voltios
300 milisegundos	125 voltios
200 milisegundos	200 voltios
150 milisegundos	240 voltios
100 milisegundos	320 voltios
40 milisegundos	500 voltios

## 9 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 si 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

## 10 REFERENCIAS

- ✓ ANSI C2 - 1990: National Electric Safety Code (NESC).
- ✓ ANSI/IEEE 80 - 2000: Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- ✓ ANSI/IEEE Std 142-1982: Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial power Systems.
- ✓ ANSI/IEEE Std 81 - 1983: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance.
- ✓ ANSI/IEEE Std 837-1989: Std for Qualifyng Permanent Connections used in Substation Grounding.
- ✓ 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.
- ✓ IEC 61000-5-2 (1997-11) Electromagnetic compatibility part 5: Instalation and mitigation guidelines - section two: Earthing and cabling.
- ✓ IEC 364-3 (1993) Electrical Installations of Buildings. Part 3.
- ✓ IEC 364-3 (1994) Electrical Installations of Buildings. Part 3.
- ✓ IEC 364-5-54 (1980) Electrical Installations of Buildings. Chapter 54. Earthing arrangements and protective conductors.
- ✓ IEC 364-5-548 (1996) Electrical Installations of Buildings-Part 5.
- ✓ 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.
- ✓ IEEE STD 665 - 1995: Standard for Generating Station Grounding.
- ✓ NFPA 70- 2002: National Electrical Code (NEC).
- ✓ NFPA 77. Static Electricity 1993.
- ✓ ICONTEC: NTC 2050 (1999) Código Eléctrico Colombiano.
- ✓ ICONTEC: NTC 2206 - 1986 Electrotecnia. Equipo de Conexión y Puesta a Tierra.
- ✓ ICONTEC: NTC 2155 (1986) Conectores eléctricos de potencia para subestaciones.
- ✓ ICONTEC: NTC 4628. Calificación de Conexiones Permanentes Usadas en Puestas a Tierra en Subestaciones.
- ✓ UIT –T K8 –1988 (Antes CCITT) Separación en el suelo entre un cable de telecomunicación y el sistema de puesta a tierra de una instalación de energía eléctrica.
- ✓ UIT –T K11 1993 (Antes CCITT) Principios de protección contra las sobretensiones y sobrecorrientes.
- ✓ UIT –T K36 1996 (Antes CCITT) Selección de los dispositivos de protección.
- ✓ VDE 0141 (1964), Regulation for Earthings in A.C. Installations with Rated Voltage above 1 kV.
- ✓ Hasse, Peter. Protecciones contra sobretensiones de instalaciones de baja tensión. 1991.
- ✓ Mardiguian, Michel. Troubleshooting Techniques.
- ✓ Mardiguian, Michel. Grounding and Bonding.
- ✓ Casas, Favio. Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica, Cuarta Edición. 2008.
- ✓ Torres Sánchez, Horacio. El Rayo, 2002.