

## CALCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN

### RESUMEN

Se desarrolla la metodología para el cálculo de la malla de una subestación, se muestra detalladamente como se construye el algoritmo se presenta un ejemplo de aplicación manual y otro desarrollado mediante software.

**PALABRAS CLAVES:** resistencia, tensión de paso, tensión de contacto

### ABSTRACT

*The methodology is developed for the calculation of a mesh and bars of one substation, step is shown to step like it is built the algorithm and presents an example of manual application and another with where the one is applied*

**KEY WORDS:** resistance, tension in passing, contact tension.

### JOHN ASDRÚBAL HERRERA

Profesor Facultad de Tecnología  
Programa Tecnología Eléctrica  
asdru@utp.edu.co  
Universidad Tecnológica de Pereira

### OMAR CASTRO HERNANDEZ

Profesor Facultad de Tecnología  
Programa Tecnología Eléctrica  
ramo@utp.edu.co  
Universidad Tecnológica de Pereira

## 1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas RETIE [1], en revisión más reciente a la norma 2050 establece en el artículo 15 del capítulo de Puestas a tierra que toda instalación eléctrica cubierta en dicho reglamento debe disponer de un sistema de puesta a tierra (SPT), en tal forma que cualquier punto accesible a las personas que puedan transitar o permanecer allí, no estén sometidas a tensiones de paso o de contacto que superen los umbrales de soportabilidad, cuando se presente una falla, y 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 la tensión de paso o de contacto y no el valor de la resistencia de puesta a tierra tomado aisladamente.

Un bajo valor de resistencia de puesta a tierra es siempre deseable para disminuir el máximo potencial de tierra, por tanto al diseñar un sistema de puesta a tierra, es fundamental determinar tensiones máximas aplicadas al ser humano en caso de falla [1].

En el presente artículo desarrollara la metodología para el diseño de una malla de puesta a tierra teniendo en cuenta los aspectos normativos.

## 2. FUNCIONES DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA

Entre las más importantes se tienen:

2.1 Evitan sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas, operación o maniobras de disyuntores.

2.2 Proporcionar una vía rápida de descarga de baja impedancia con el fin de mejorar y asegurar el funcionamiento de protecciones.

2.3 Proporcionar seguridad al personal de la subestación.

Fecha de Recibo: 20 Mayo de 2003

Fecha de Aceptación: 27 Agosto de 2003

## 3. REQUISITOS DE UNA MALLA A TIERRA

Los requisitos que debe cumplir una malla de puesta a tierra son los siguientes:

- Debe tener una resistencia tal, que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra.
- La variación de la resistencia, debido a cambios ambientales, debe ser despreciable de manera que la corriente de falla a tierra, en cualquier momento, sea capaz de producir el disparo de las protecciones.
- Impedancia de onda de valor bajo para fácil paso de las descargas atmosféricas.
- Debe conducir las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre sus puntos vecinos.
- Al pasar la corriente de falla durante el tiempo máximo establecido de falla, (es decir disparo de respaldo), no debe haber calentamientos excesivos.
- Debe ser resistente a la corrosión.

## 4. TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO PERMISIBLES

### 4.1 Tensión de paso

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por una persona; su valor permisible esta dado por:

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Donde:

$E_p$  = Tensión de Paso Permisible en voltios.

$\rho_s$  = Resistividad de la superficie del terreno en ( $\Omega$ -m)

$t$  = Duración máxima de falla en segundos.

#### 4.2 Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que se pueda ser tocado simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$E_t = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

En donde:

$E_t$  = Tensión de contacto permisible en voltios.

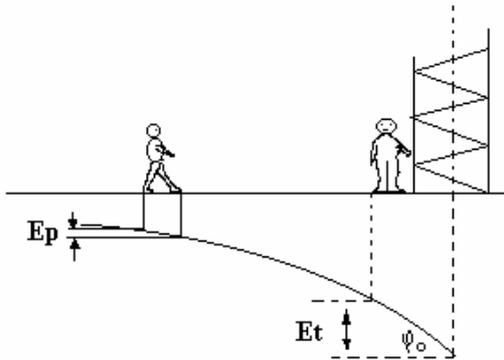


Figura 1: Tensión de paso  $E_p$  y de contacto  $E_t$

### 5. DISEÑO DE UNA MALLA A TIERRA

El diseño de una malla a tierra está afectado por las siguientes variables:

- Tensión Permissible de Paso.
- Tensión Permissible de contacto.
- Configuración de la malla.
- Resistividad del terreno
- Tiempo máximo de despeje de la falla.
- Conductor de la malla.
- Profundidad de instalación de la malla.

#### 5.1 Selección del conductor de la Malla

Para calcular la sección del conductor se aplica la siguiente ecuación:

$$A_c = I \left( \frac{33t}{\log \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

En donde:

$A_c$  = Sección del conductor (CM).

$I$  = Corriente máxima de falla (Amp.)

$T_m$  = Temperatura máxima en los nodos de la malla (450°C con soldadura y 250°C con amarre pernado.)

$T_a$  = Temperatura ambiente (°C).

$t$  = Tiempo máximo de despeje de la falla (seg).

Sin embargo, la sección mínima recomendable es 2/0 AWG para la malla y 5/8" para las varillas, estos valores mínimos están de acuerdo con prácticas internacionales.

#### 5.2 Tensiones Reales de Paso y de contacto

La tensión de paso real en una subestación está dada por:

$$E_p = k_s k_i \frac{\rho I}{L} \quad (4)$$

En donde:

$E_p$  = Tensión de paso real en voltios.

$k_s$  = Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia combinada de la profundidad y del espaciamiento de la malla.

$k_i$  = Coeficiente de irregularidad del terreno.

$\rho$  = Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m)

$I$  = Corriente máxima de falla (Amp)

$L$  = Longitud total del conductor (m)

La tensión de contacto real está dado por:

$$E_t = k_m k_i \frac{\rho I}{L} \quad (5)$$

Donde:

$E_t$  = Tensión de contacto en voltios.

$k_m$  = Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.

#### 5.3 Determinación de los coeficientes $k_m$ , $k_i$ , $k_s$ .

Para la determinación de los coeficientes es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

$A$  = Longitud de la malla (m).

$B$  = Ancho de la malla(m).

$L$  = Longitud total del conductor (m).

$n$  = Número de conductores en paralelo de longitud  $A$

$m$  = Número de conductores en paralelo de longitud  $B$ .

$D$  = Espaciamiento entre conductores (m).

$h$  = Profundidad de enterramiento (m).

$d$  = Diámetro del conductor(m)

La longitud total del conductor está dada por

$$L = n * A + m * B \quad (6)$$

$k_m$  es:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{D^2}{16hd}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \dots\right) \quad (7)$$

n-2 términos

$k_i$  es:

$$k_i = 0.65 + 0.172n \quad n \leq 7 \quad (8)$$

$$k_i = 2.0 \quad n > 7 \quad (8a)$$

$k_s$  es:

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right) \quad (9)$$

**5.4 Valor de la resistencia de Puestas a Tierra.**

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra se puede hacer por el método de Laurent y Niemann o por método de Dwinght.

**5.4.1 Método de Laurent y Niemann**

Este método es bastante aproximado y la expresión para el cálculo es:

$$R = 0.443\rho \left( \frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L} \right) \quad (10)$$

Donde:

$R$  = Resistencia en ohmios.

$A\gamma$  = Área de la malla de puesta a tierra en  $m^2$

$\rho$  = Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m)

$L$  = Longitud total del conductor (m).

La ecuación (10) es una aproximación y su resultado siempre es mayor que el valor real.

**5.4.2 Método de Dwight**

Este método es mucho más largo pero es mucho más exacto que el anterior.

El primer paso consiste en hallar la resistencia de un conductor de la malla.

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L'} \left( \ln\left(\frac{2L'}{r}\right) + \ln\left(\frac{L'}{h}\right) + \frac{2h}{L'} \frac{h^2}{(L')^2} - 2 \right) \quad (11)$$

Donde:

$R_s$  = Resistencia de puesta a tierra de un solo conductor en  $\Omega$

$\rho$  = Resistividad en ( $\Omega$ -m)

$L'$  = Longitud del conductor (m)

$h$  = Profundidad de enterramiento del conductor (m)

$r$  = Radio del conductor en m.

Una vez calculada esta resistencia, se procede al cálculo de las resistencias debidas a las interferencias mutuas entre los conductores, tal resistencia es:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L'} \left( \ln\left(\frac{4L'}{E}\right) + \ln\left(\frac{E}{2L}\right) \frac{E^2}{16(L')^2} - 1 \right) \quad (12)$$

Donde:

$R_a$  = Resistencia mutua en  $\Omega$

$E$  = Espaciamiento equivalente entre un conductor y los demás en m.

La resistencia total de un conductor es:

$$R_c = R_s + (n-1)R_a \quad (13)$$

La resistencia de n conductores es:

$$R_{cn} = \frac{R_c}{n} \quad (14)$$

También en forma análoga se determina la resistencia de los conductores transversales de unión.

La resistencia “mutua” de los componentes de unión incluyendo la interferencia debida a los conductores transversales a los cuales se encuentran unidos es:

$$R_{am} = (m-1)R_{au} + (n-1)R_a \quad (15)$$

$R_{au}$  = Resistencia mutua de conductores de unión ( $\Omega$ )

La resistencia total de un solo conductor de unión es:

$$R_{cu} = R_{su} + R_{am} \quad (16)$$

$R_{su}$  = Resistencia de un solo conductor de unión ( $\Omega$ )

La resistencia de los  $m$  conductores es:

$$R_{cm} = \frac{R_{cu}}{m} \quad (17)$$

La resistencia total de la malla está dada por:

$$R = \frac{R_{cn} * R_{cm}}{R_{cn} + R_{cm}} \quad (18)$$

## 6. EJEMPLO

Cálculo de la malla de tierra de una subestación con los siguientes datos:

Dimensiones del patio: 40 x 50 m<sup>2</sup>

Corriente máxima de falla: 1000 A

Nivel de Tensión (primario): 34.5 kV

Resistividad del suelo: 300 (Ω-m)

Resistividad de la superficie: 2000 (Ω-m)

Tiempo máximo de falla: 1 seg.

### 6.1 Selección del conductor

Sea  $T_a = 30^\circ\text{C}$

$T_m = 250^\circ\text{C}$  (uniones pernadas)

Aplicando la Ec (3)

$$A_c = 1000 \left( \frac{33 * 1}{\log \left( \frac{250 - 30}{234 + 30} + 1 \right)} \right)^{1/2} \text{ CM}$$

$$A_c = 11213 \text{ CM}$$

1 cm =  $5 \times 10^{-4}$  mm<sup>2</sup>, 11213 CM = 5.606 mm<sup>2</sup>

El diámetro del conductor es = 2.6716 mm

Aproximando al calibre mínimo permitido por la norma se elige el conductor AWG 2/0 que tiene un diámetro igual a 10.52 mm

### 6.2 Elección de la malla

Supóngase que se tiene cuadrados de 10m:

Por lo tanto:

A = 50m

B = 10m

n = 5

m = 6

D = 10m

El conductor se enterrará a 70 cm

h = 0.7m

d = 0.01052

L = (5x50) + (6x40) = 490 m

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{10^2}{16 * 0.7 * 0.01052} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \right)$$

$$k_m = 0.881$$

$$k_i = 0.65 + (0.172 * 5)$$

$$k_i = 1.5$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 * 0.7} + \frac{1}{10 + 0.7} + \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{40} \right)$$

$$K_s = 0.291$$

Cálculo de las tensiones permisibles de paso y contacto utilizando (5) y (6).

$$E_p = \frac{165 + 2000}{\sqrt{1}} - 2165 \text{ voltios}$$

$$E_t = \frac{165 + 0.25 * 2000}{\sqrt{1}} - 665 \text{ voltios}$$

Los valores reales son:

$$E_p = \frac{0.281 * 1.51 * 300 * 1000}{\sqrt{490}} = 268 \angle 2165 \text{ voltios}$$

$$E_t = \frac{0.881 * 1.51 * 300 * 1000}{\sqrt{490}} = 814 \geq 665 \text{ voltios}$$

La disposición escogida no cumple con el valor permisible de  $E_t$

Se ensaya una nueva disposición con cuadrícula de 7m (con 9m ó 8m no cumple)

Los nuevos valores son:

A = 49m

B = 42m

n = 7

m = 8

D = 7m

L = 7\*49 + 8\*42 = 679

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{7^2}{16 * 0.7 * 0.01052} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \frac{9}{10} \right)$$

$$K_m = 0.734$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 * 7 = 1.854$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 * 0.7} + \frac{1}{7 + 0.7} + \frac{1}{14} + \frac{1}{21} + \frac{1}{28} + \frac{1}{35} \right)$$

$$K_s = 0.327$$

$$E_p = \frac{0.327 * 1.854 * 300 * 1000}{679} = 267.86 < 2165v$$

$$E_p = \frac{0.734 * 1.854 * 300 * 1000}{679} = 601.25 < 665v$$

Debido a que estos valores si cumplen. se continúa el cálculo:

$$R = 0.443 * 300 \left( \frac{1}{\sqrt{2058}} + \frac{1}{679} \right)$$

$$R = 3.126\Omega$$

Cálculo de la resistencia por el método de Dwight:

$$R_s = \frac{300}{2\pi * 49} \left( \ln \left( \frac{2 * 49}{0.00526} \right) + \ln \left( \frac{49}{0.7} \right) + \frac{2 * 0.7}{49} - \frac{0.7^2}{49^2} - 2 \right)$$

$$R_s = 11.800\Omega$$

$$E = 2.191D = 2.191 * 7 = 15.337m$$

$$R_a = \frac{300}{2\pi * 49} \left( \ln \left( \frac{4 * 49}{15.337} \right) + \frac{15.337}{2 * 49} + \frac{(15.337)^2}{16(49)^2} - 1 \right)$$

$$R_a = 1.654\Omega$$

$$R_c = 11.300 + (7-1) * (1.654) = 21.724\Omega$$

$$R_{cn} = 21.724 / 7 = 3.103\Omega$$

$$R_{su} = \frac{300}{2\pi * 42} \left( \ln \left( \frac{2 * 42}{0.00526} \right) + \ln \left( \frac{42}{0.7} \right) + \frac{2 * 0.7}{42} - \frac{0.7^2}{42^2} - 2 \right)$$

$$= 13.421\Omega$$

$$E = 2.430D$$

$$E = 2.430 * 7 = 17.010m$$

$$R_{ak} = \frac{300}{2\pi * 42} \left( \ln \left( \frac{4 * 42}{17.010} \right) + \ln \left( \frac{17.010}{2 * 42} \right) - \frac{17.010^2}{16 * 42^2} - 1 \right)$$

$$= 1.685\Omega$$

$$R_{am} = (8-1) * (1.685) + (7-1) * (1.654) = 21.719\Omega$$

$$R_{cu} = 13.421 + 21.719 = 35.140\Omega$$

$$R_{cm} = 35.140 / 8 = 4.392\Omega$$

$$R = \frac{3.103 * 4.392}{3.103 + 4.392} = 1.818\Omega$$

$$1.818\Omega < 3\Omega$$

Por lo tanto la disposición asumida de garantía tanto de tener los voltajes de paso y contacto dentro de los permisibles como de que su resistencia es menor que el máximo aceptado.

## 7. CÁLCULO DEL NÚMERO DE VARILLAS DE PUESTAS A TIERRA VERTICALES.

El uso de varillas de tierra como único medio de puesta a tierra en una subestación, no es recomendable, ya que con estas no se logra una superficie equipotencial, y por lo tanto las tensiones de paso y de contacto toman valores peligrosos.

### 7.1 Cálculo de la resistencia de una varilla

La resistencia de una varilla enterrada a una profundidad comprendida entre 0.5 y 1m, se calcula por

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \left( \frac{4L}{r} \right) - 1 \right) \quad (19)$$

Donde:

$R_v$  : Resistencia de una varilla en  $\Omega$

$\rho$  : Resistividad del terreno ( $\Omega$ -m)

$L$  : Longitud de la varilla (m)

$r$  : radio de la varilla en m

### 7.2 Número Mínimo de Varillas

Datos de laboratorio muestran que existe un límite en el número de varillas en paralelo, pues su efectividad decrece cuando su número aumenta. Estos resultados se deben al siguiente fenómeno: cuando el número de varillas aumenta en determinada área, el espacio entre electrodos decrece. Los cilindros frontera de las varillas, los cuales determinan la resistencia de tierra, tienden a entrecruzarse, reduciendo así la efectividad individual de cada varilla. Manejar demasiadas varillas en un espacio muy estrecho resulta muy costoso y no reduce significativamente la resistencia.

Para determinar el número aproximado de varillas requeridas en un área dada de una subestación, se deben seguir los siguientes pasos.

- Calcule la resistencia de una varilla.
- Halle la conductividad de esa varilla.
- Determine la resistencia deseada del aterrizamiento.
- Halle la conductividad de la resistencia anterior.
- Calcule la siguiente razón:

Conductividad deseada / conductividad de cada varilla

- Determine el área de la subestación
- halle el número de varillas deseadas.

### 7.3 Otras consideraciones.

7.3.1 Si al hallar la razón de conductividad se observa que su valor excede el límite dado para un número infinito de varillas, se sugiere aumentar el área de la subestación o colocar varillas de un largo mayor de 10 ft para alcanzar suelos de mejor resistividad, a tratar el suelo.

7.3.2 Se sugiere colocar las varillas lo más uniformemente distribuidas que se puedan, y en sitios importantes tales como pararrayos y neutros de los transformadores de potencia.

7.3.3 En caso de que el diseño este orientado a una planta o subestación de gran importancia en donde exista la posibilidad de gradientes de potencial peligrosos para el personal aún con la colocación de una buena malla y de varillas de puestas a tierra, la práctica usual es la colocación de contrapesos.

## 8. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se desarrollará utilizando el software MT, el cual se diseño con metodología IEEE\_80.

### 8.1 DATOS:

CORRIENTE MAXIMA DE FALLA 20000 A  
 NIVEL DE TENSION 33 KV  
 RESISTIVIDAD DEL SUELO 400 OHMIOS  
 RESISTIVIDAD SUPERFICIAL 800 OHMIOS  
 TIEMPO MAXIMO DE FALLA .2 SEG  
 CONDUCTOR ELEJIDO 2/0 AWG  
 LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR 650 MTS  
 ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES 2 MTS  
 NUMERO DE CONDUCTORES PARALELO a A 11  
 NUMERO DE CONDUCTORES PARALELO a B 16  
 PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO .5 MTS

### 8.2 RESULTADOS:

KM= .2170901  
 KS= .8134693  
 RESISTENCIA DE LA MALLA SEGUN LAURENT Y NIEMAN= 7.849544  
 RESISTENCIA DE LA MALLA SEGUN DWIGHT= 5.700067  
 VALORES PERMISIBLES DE EP Y ET  
 TENSION DE PASO = 2157.806 VOLTIOS  
 TENSION DE CONTACTO= 816.1648 VOLTIOS  
 VALORES REALES DE EP Y ET  
 TENSION DE PASO= 20.02386 VOLTIOS  
 TENSION DE CONTACTO = 5.343755 VOLTIOS

## 9 .CONCLUSIONES

Este diseño presenta un pequeño sobredimensionamiento, No obstante dado que el objetivo principal es proporcionar ante todo seguridad humana, el costo queda relegado a un segundo plano.

La Norma ANSI IEEE 80\_2000 introduce algunos cambios interesantes a la metodología empleada en este artículo, dichas diferencias se analizaran en un artículo próximo.

Se espera en un futuro disminuir la complejidad de los cálculos, algunos de los cuales, se obtienen aún de forma empírica.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] REGLAMENTO TÉCNICO PARA INSTALACIONES ELECTRICAS “**RETIE**”  
<http://minminas.gov.co>
- [2] GARCIA MARQUE ROGELIO “**LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELCTRICAS**”  
 Editorial Alfa y Omega 1999
- [3] NORMA ANSI/IEEE Std 80 \_1986.
- [4] NORMA ANSI/IEEE Std 80 \_2000.
- [5] DIAS PABLO “**SOLUCIONES PRACTICAS PARA LA PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS ELECTRICOS**” Editorial Mc Graw Hill 2001.