

# DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Néstor S. Mamani Villca

## Resumen

Debido a la instalación de los sistemas de tierra en repetidoras y terminales en el campo de las telecomunicaciones que en los últimos años se ha dado, existe la necesidad de fundamentar algunos aspectos que aparentemente no son cuantificables. Para diseñar sistemas de puesta a tierra es necesario contar con herramientas matemáticas suficientes como para garantizar la protección de los equipos contra las descargas atmosféricas, debido al alto nivel isocerámico (número de tormentas eléctricas por año) en algunas regiones de nuestro país.

El sistema de puesta a tierra ofrecerá protección al personal que opere en el lugar, contra las tensiones de paso y de contacto tolerables al cuerpo humano.

Primero es esencial conocer los parámetros del suelo donde se instalará el sistema de puesta a tierra, la que se realiza frecuentemente por mediciones con el método de Wenner, se estima el modelo de dos capas, y finalmente se realiza el diseño por métodos que se describirán y son ampliamente conocidos en este campo.

## Palabras clave:

Sistema de de puesta a tierra, descargas atmosféricas, parámetros eléctricos del suelo, resistencia mutua, estratificación, resistividad aparente, malla de tierra, radiales.

## 1. Introducción

Con el continuo incremento en los costos del cobre y otros conductores comúnmente usados en los sistemas de tierra, es necesario tener modelos precisos para alcanzar diseños económicos que aseguren al equipamiento y el personal. Al respecto existen bastantes avances y textos, por ejemplo el método matricial, que es bastante preciso para configuraciones de malla de geometrías simétricas y asimétricas, pero necesita de algoritmos bastante eficientes para el cálculo de resistencia de puesta a tierra.

Estamos concientes por otro lado que no se da la suficiente importancia al cálculo preciso de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra, ni siquiera con las fórmulas aproximadas y se prefiere la técnica empírica de *prueba y error*, que combinado con una mala medición y sin los cuidados suficientes no garantiza el objetivo de una puesta a tierra.

La técnica básica universalmente usada para medir la resistencia de puesta tierra de pequeños sistemas es conocido como *caída de potencial*. Este método presenta muchas dificultades y errores cuando es usado para medir la resistencia de sistemas grandes, para la cual se mencionaran algunas recomendaciones.

## 2. Fundamento teórico

### 2.1. Medición de resistividad

Es necesario disponer de cuatro electrodos equidistantes enterrados en el suelo. Esta configuración de F. Wenner se muestra en la figura 1.

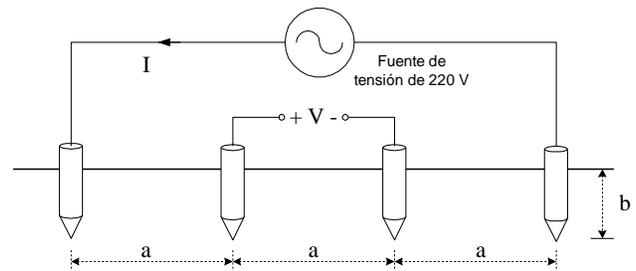


Figura 1. Medición de resistividad

Para este método se debe disponer de una fuente de corriente industrial, y midiendo la corriente inyectada  $I$  entre los electrodos externos, y el voltaje  $V$ , entre los electrodos internos es posible calcular la resistencia aparente,  $r_a$ . Si se dispone de un instrumento medidor de tierra de cuatro terminales se puede obtener la resistividad aparente directamente.

Palmer desarrolló la siguiente fórmula, para determinar la resistividad aparente.

$$\rho_a = \frac{4 \pi a r_a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (1)$$

donde:

- $\rho_a$ : resistividad aparente,  $\Omega$ -m  
 $a$ : distancia entre electrodos, m  
 $b$ : profundidad de enterramiento electrodo, m  
 $r_a=V/I$ : resistencia aparente,  $\Omega$

La resistividad del suelo varía con la humedad, la temperatura, la estratificación geológica, composición química del suelo, además horizontal y verticalmente, por tanto se debe tomar la mayor cantidad de medidas en diferentes lugares y en todas las direcciones alrededor del sitio elegido.

## 2.2. Elección del modelo de suelo

De las medidas de resistividad aparente  $\rho_a$  y la separación entre electrodos  $a$ , se puede tener una estimación grosera de la característica eléctrica del suelo. El mejor modelo que se caracteriza por su simplicidad y representatividad es el modelo del suelo de dos capas, como se ve en la figura 2.

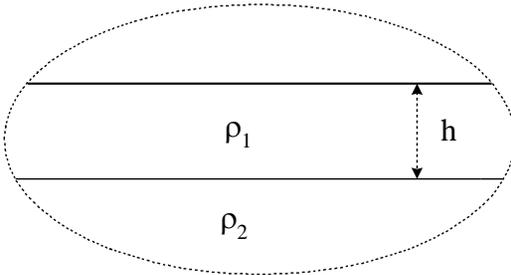


Figura 2, modelo de suelo dos capas

donde:

- $\rho_1$ : resistividad de la capa superior,  $\Omega$ -m.  
 $\rho_2$ : resistividad del capa inferior,  $\Omega$ -m.  
 $h$ : espesor de la capa superior, m.

A partir de la ecuación de La Place:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (2)$$

se obtiene la expresión matemática que relaciona el modelo de dos capas con las medidas de resistividad aparente:

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2nh}{a} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left( \frac{2nh}{a} \right)^2}} \right] \right\} \quad (3)$$

donde  $K$ , es denominado coeficiente de reflexión de la corriente inyectada:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (4)$$

A partir de las mediciones de  $\rho_a$  y  $a$  se debe estimar  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ . Se ve que es un problema formidable. A lo largo de las últimas dos décadas se han planteado diferentes métodos de solución. Ya sean gráficos como el método de Sunde, o analíticos como el método de la gradiente.

Se puede resolver mediante métodos de optimización de programación no lineal, como el método de Fletcher Reeves,

## 2.3. Algunas fórmulas para evaluar resistencia de puesta a tierra.

Para sistemas de tierra ya instalados se puede calcular la resistencia de puesta a tierra a través de fórmulas desde las más simples hasta los más complejos, como se muestra a continuación.

Una fórmula bastante simple es la de Laurent-Niemann aplicado a la configuración de malla y jabalinas.

$$R_g = \frac{\rho_2}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho_1}{l_1 + nl_2} \quad (5)$$

donde:

- $R_g$ : resistencia de puesta a tierra,  $\Omega$ .  
 $l_1$ : longitud total de conductores de malla, m.  
 $l_2$ : longitud de cada jabalina, m  
 $n$ : número de jabalinas.  
 $A$ : área de la malla,  $m^2$ .

Se recomienda no usar jabalinas si  $\rho_2 > \rho_1$ , debido a que la jabalina debe alcanzar profundidades de baja resistividad para que sea más efectivo.

Otra fórmula bastante utilizada que introduce la resistencia mutua, tan real en los elementos conductores embebidos en un medio conductores es la de Schwarz

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (6)$$

donde:

$R_1$ : resistencia de conductores de malla,  $\Omega$ .

$R_2$ : resistencia de las jabalinas,  $\Omega$

$R_{12}$ : resistencia mutua malla-jabalinas,  $\Omega$ .

La evaluación de las resistencias mencionadas está en función de la geometría del sistema.

La resistencia de puesta a tierra de una sola jabalina en un suelo de dos capas está dada por la siguiente expresión aproximada:

$$R_g = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (7)$$

$$\rho_a = \frac{L\rho_1\rho_2}{\rho_2 h + \rho_1(L-h)} \quad (8)$$

donde:

$L$ : longitud de la jabalina, m

$d$ : diámetro de la jabalina, m

La resistencia de puesta a tierra para  $n$  jabalinas en línea como se ve en la figura 3, se desarrolla a continuación:

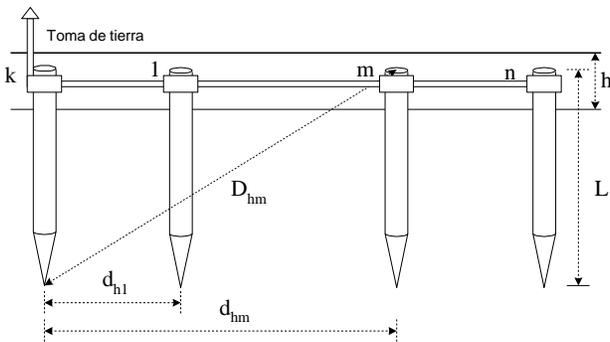


Figura 3, jabalinas en línea

La resistencia de una jabalina bajo la influencia de las otras jabalinas es:

$$R_k = R_g + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n R_{km} \quad (9)$$

$$R_{km} = 0.813 \frac{\rho_a}{L} \log \left[ \frac{(D_{km} + L)^2 - d_{km}^2}{d_{km}^2 - (D_{km} - L)^2} \right] \quad (10)$$

donde:

$$D_{km} = \sqrt{L^2 + d_{km}^2} \quad (11)$$

La resistencia total de la puesta a tierra, considerando el total de las jabalinas es:

$$R_g = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{k=1}^n R_{jk}}} \quad (12)$$

## 2.5. Medición de resistencia de puesta a tierra

Como se ve en la figura 4, la corriente  $I$  entra al sistema de tierra  $E$ , y retorna a través del electrodo  $C$ , la diferencia de potencial entre  $E$  y un punto de la superficie del suelo, se mide usando un probador de potencial  $P$ .

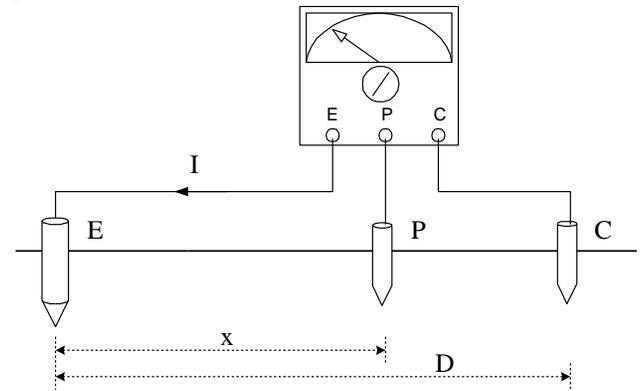


Figura 4, medida de resistencia de puesta a tierra

Para la nomenclatura, si  $V_G^M$ , es el potencial causado por el electrodo  $G$  en el punto  $M$ , entonces los potenciales de los electrodos  $P$  y  $E$  son:

$$U_P = V_P^E - V_P^C \quad (13)$$

$$U_E = V_E^E - V_E^C \quad (14)$$



NOMBRE UBICACION : Chullullulloy

SEPARACION DE ELECTRODOS (a) : 1. en m  
 2. en pies 1

RESISTENCIA APARENTE (r\_a) : 1. en Ohm  
 RESISTIVIDAD APARENTE (rho\_a): 2. en Ohm-m 1  
 Enterramiento de electrodos, en m. : 0.15

-----+-----+  
 Debe ingresar datos de espaciamiento {23:47:46} de electrodos (orden ascendente) vs. {23:47:46} resistencia aparente, finalizando +-----+ con a=0 y r\_a=0

a, r\_a  
 2,30.5  
 5,12  
 7,6.3  
 10,4.1  
 15,2.6  
 0,0

METODO USADO : FLETCHER REEVES

+-----+-----+  
 | Resistividad de capa superior. 419.11 Ū-m. {23:48:45} |  
 | Resistividad de capa inferior. 226.31 Ū-m. {23:49:00} |  
 | Espesor de capa superior. 3.24 m. +-----+ |  
 | Coeficiente de correlación. .9319 - |  
 +-----+-----+

[Ohm-m] |  
 a rho\_a rho\_a |  
 | \* |  
 medido calculado |  
 384 | \* |  
 [m] [Ū-m] [Ū-m] |  
 | . | +--  
 -----+-----+  
 314 | . | 2  
 387.0138 403.63 |  
 | \* | 5  
 377.5837 330.66 |

```

244 | .....*.....* | 7
277.3108 293.23 |
| ..... |
10 | 257.7118 261.86 |
174 | |
15 | 245.0869 241.5 |
| | +--
-----+-----+
104 |
| |
34 +-----+ [m]
0 4 9 13 18 22
Ajuste fino (s/n) ?
    
```

Resistividad capa superior (Ω-m)	419.11
Resistividad capa inferior (Ω-m)	226.31
Espesor de la capa superior (m)	3.24

### 3.2. Diseño de sistema de puesta a tierra

Para instalar una malla de tierra se disponía de un área de 25 x 27.5 m<sup>2</sup>, para obtener una resistencia de 5 Ω se aplicó el programa, que a continuación se da:

```

+-----+-----+
| |
| | DISEÑO DE SISTEMAS DE
PUESTA A TIERRA | PARA REPETIDORAS Y
| | TERMINALES |
| | | Nestor
Mamani Villca |
+-----+-----+
| |
| | Repetidora :
Chullullulloy |
+-----+-----+
    
```

```

+-----+-----+
| |
| | DISEÑO DE SISTEMAS DE
PUESTA A TIERRA | PARA REPETIDORAS Y
| | TERMINALES |
| | | Nestor
Mamani Villca |
+-----+-----+
    
```

Repetidora :  
Chullulluloj

Resistividad aparente. :  
248.94 ohm-m.

DATOS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Resistencia de Puesta a Tierra, en ohm. : 5  
Longitud del lado menor, en m. : 25  
Longitud del lado mayor, en m. : 27.5  
Resistividad de la capa superior, en ohm-m. : 419.11  
Resistividad de la capa inferior, en ohm-m. : 226.31  
Espesor de la capa superior, en m. : 3.24  
Longitud del radial jabalina-jabalina, en m. : 10  
Longitud de jabalina en m. : 3  
Diámetro de jabalina, en mm. : 16  
Diametro del conductor de malla, en mm. : 9.6  
Cambia parametros. (S/N) :

Esta malla fue instalada y por seguridad y para garantizar la protección ante las descargas atmosféricas se adicionó radiales y más cable colocándose 34 jabalinas en las finales de los radiales y uniformemente espaciadas dentro de la malla.

+-----+  
-----+  
|  
|  
| DISEÑA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA |  
| CALCULA RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA |  
|  
|  
| Nestor Mamani |  
Villca |  
|  
|  
+-----+  
-----+

CONFIGURACION DE LA MALLA

Repetidora :  
Chullulluloj  
Longitud del conductor de malla. : 371.175 metros.  
Longitud de conductor de radiales. : 0 metros  
Numero de conductores, lado mayor. : 7  
Numero de conductores, lado menor : 7  
Numero de jabalinas. : 0  
Longitud total del conductor. : 371.175 metros.  
Espaciamiento lado mayor de malla. : 4.62 metros.  
Espaciamiento lado menor de malla. : 4.2 metros.  
Enterramiento de malla. : .3 metros.

NOMBRE UBICACION ? Chullulloj

PARAMETROS DEL SUELO

RESISTIVIDAD DE CAPA SUPERIOR, en Ohm-m. : ? 419.11  
RESISTIVIDAD DE CAPA INFERIOR, en Ohm-m. : ? 226.31  
ESPESOR DE CAPA SUPERIOR, en m. : ? 3.24

MENU DE TIPO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

- 
- 1 MALLA CON RADIALES Y JABALINAS.
- 2 MALLA SIN RADIALES Y JABALINAS.
- 3 JABALINAS EN LINEA.
- 4 JABALINAS EN RADIAL.
- 5 CAMBIO DE PARAMETROS DEL SUELO.
- 6 ? 1 SALIR.

CARACTERISTICA ELECTRICA.

MENU DE DISEÑO Y/O CALCULO

DISEÑO DE SISTEMA DE TIERRA. 1  
 CALCULO DE RESISTENCIA DE TIERRA. 2  
 OTRO SISTEMA. 3

? 2

## DATOS DE ENTRADA

```

-----
Longitud del lado menor, en m.
: ? 25
Longitud del lado mayor, en m.
: ? 27.5
Número de conductores lado mayor.
: ? 12
Número de conductores lado menor.
: ? 11
Número de jabalinas.
: ? 34
Enterramiento de malla, en m.
: ? 0.6
Longitud radial jabalina-jabalina, en
m. : 10
Longitud de jabalina, en m.
: 3
Diámetro de jabalina, en mm.
: 16
Diámetro del cable de malla, en mm
: 9.6

```

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA : 4.33  
 ± .32 Ω

```

-----+-----+
Método
Calculado ;00:22:07;
LAURENT-NIEMANN 4.22
| |
LAURENT-NIEMANN mejorado 4.22
+-----+
NAHMAN-SKULETICH 4.97
SVERAK 4.03
SCHWARZ 4.24
-----

```

RESISTIVIDAD APARENTE : 234.37  
 Ω-m

Longitud total de cable. :  
 942.5 m.

La resistencia de puesta a tierra esperada era de **4.33 Ω**

La lectura se realizó con un medidor de tierra de tres terminales, con una longitud de cable de 90 m, dando como resultado:  $R_g = 4.6 \Omega$ .

### 3.2. Influencia de las jabalinas

Con el programa es posible analizar el efecto de las jabalinas, para ello determinaremos la resistencia de una sola jabalina, con los mismos datos de resistividad del modelo de dos capas adoptado:

## DATOS DE ENTRADA

```

-----
Número de jabalinas.
: ? 1
Longitud de jabalina, en m.
: 3
Diámetro de jabalina, en mm.
: 16
Diámetro del conductor de unión, en
mm.: 9.6
Enterramiento del cable de unión, en
m.: .3

```

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA :  
 163.81 Ω

Para dos jabalinas, separados 3 m, y bajo las mismas características:

## DATOS DE ENTRADA

```

-----
Número de jabalinas.
: ? 2
Distancia jabalina-jabalina, en m.
: ? 3
Longitud de jabalina, en m.
: 3
Diámetro de jabalina, en mm.
: 16
Diámetro del conductor de unión, en
mm.: 9.6
Enterramiento del cable de unión, en
m.: .3

```

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA :  
 91.76 Ohm

Para dos jabalinas separados 30 cm

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA :  
 110.82 Ω

La diferencia es por el efecto de la resistencia mutua, es conveniente recomendar que las jabalinas deben

instalarse separados por lo menos el doble de su longitud para que tengan efectividad y su comportamiento se aproxime a resistencias en paralelo como en los circuitos eléctricos.

#### 4. Conclusiones

Para realizar el diseño de sistemas de tierra es imprescindible tener los datos de resistividad del suelo, mejor si se adopta el modelo de suelo de dos capas, se debe tomar en cuenta que esta medida se debe hacer en la estación más seca del año.

En el diseño de un sistema de puesta a tierra no se ha considerado el mejoramiento del suelo mediante reductores de resistividad, su inclusión obviamente hará disminuir la resistencia de tierra, por otro lado esta variable no es fácilmente cuantificable.

La medición de un sistema de tierra se la debe realizar con el mayor cuidado y ante todo con responsabilidad y ética, debido a que es muy fácil falsear estas medidas simplemente acercando el electrodo de potencial P hacia E, en lo posible utilizar la tabla recomendada.

Se puede realizar aproximaciones bastante aceptables en una primera estimación, conociendo el tipo de suelo y aplicando la fórmula de Laurent-Niemann haciendo que  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ .

El método de medición de resistividad y su tratamiento matemático se puede usar para hallar agua en sectores donde se necesita agua para aplicaciones de riego, también se emplea para prospección petrolífera y finalmente para investigación geológica de estratificaciones.

#### 5. Bibliografía

- [1] Néstor S. Mamani Villca. *Manual para el diseño de sistemas de puesta a tierra*, PROGRAMA FAD-ENTEL, 1993.
- [2] Y. L. Chow, M. M. A. Salama, *A Fast and Accurate Analysis of Grounding Resistance of a Driven Rodbed in a Two-Layer Soil*, IEEE, Power Delivery, April 1996.
- [3] D. L. Garret, H. J. Holley *Calculation of Substation Grounding System Resistance Using Matrix Techniques*, IEEE Power Apparatus and Systems, 1980,
- [4] R. P. Webb, E. B. Joy, *Analysis of grounding systems*, IEEE Power Apparatus and Systems, 1981, A. P. Meliopoulos,.
- [5] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, *Influence of ground rods on grounding grids*, IEEE PAS 1979.
- [6] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, *Resistance calculation of interconnected Grounding Electrodes*, IEEE PAS 1977
- [7] Geraldo Kindermann, *Aterramento Eléctrico*, Brasil 1995,
- [8] J. J. Martinez Requena, J. C. Toledino Gasca, *Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas*, Paraninfo, segunda edición, 1998
- [9] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, *Resistance Measurement of Large Grounding Systems*, IEEE PAS, 1979

#### Néstor S. Mamani Villca

Realizó estudios universitarios en la Facultad de Ingeniería de la UMSA, donde se graduó como Ingeniero Electricista, posteriormente realizó estudios de Post Grado en la carrera de Ingeniería Electrónica en Sistemas de Control.

Ha ejercido la Cátedra Universitaria en la Facultad de Ingeniería y la Facultad Técnica de la Universidad Mayor de San Andrés y docencia en la Escuela Industrial Superior Pedro Domingo Murillo. Ha ejercido el cargo de supervisor en el programa FAD-ENTEL de la RED TRONCAL, ha realizado proyectos en redes de distribución, actualmente es Director de la carrera de Electricidad, UMSA.

Sus áreas de interés son: Sistemas de tierra, Redes de distribución Electrónica de Potencia, Máquinas Eléctricas y Control.