

# Diseño de la Malla de Puesta a Tierra en la Subestación Terminal Terrestre

Alfredo Rosendo Vera Sánchez<sup>(1)</sup>, Ángel Recalde Lino<sup>(2)</sup>, Douglas Aguirre Hernández<sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación-FIEC  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
[alfredo-ver@hotmail.com](mailto:alfredo-ver@hotmail.com)<sup>(1)</sup>, [arecalde@espol.edu.ec](mailto:arecalde@espol.edu.ec)<sup>(2)</sup>, [daguirre@espol.edu.ec](mailto:daguirre@espol.edu.ec)<sup>(3)</sup>

## Resumen

*El presente trabajo trata del diseño de la malla de la Subestación Terminal Terrestre situada en la ciudad de Babahoyo, se realizó mediciones del suelo para calcular la resistividad del suelo. También se obtuvieron las corrientes de corto-circuito en barras de 69/13.8KV de la Subestación. Se realizaron los cálculos para determinar: resistencia de la malla, calibre del conductor, la longitud teórica de la malla a tierra, los voltajes de malla, paso y contacto con el objeto de determinar si la malla es segura. En el proceso de construcción de la malla a tierra, las conexiones se realizaron con conectores de compresión con la novedad de soldar varilla de plata al 45% a los lados del conector maquinado con el propósito de evitar la entrada de humedad que afectaría con el tiempo al formarse una capa de sulfato de cobre del conector maquinado desmejorando la resistencia de la malla. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios. En un periodo de diez años, se realizó algunas mediciones a tierra las conexiones a los equipos y estructuras metálicas, manteniéndose la mayoría de las mediciones menores a un ohmio.*

**Palabras Claves:** malla de puesta a tierra, subestación eléctrica, resistividad de suelo, conectores, soldadura.

## Abstract

*The present work is about the design of the Terminal Terrestre Substation grounding mesh in the city of Babahoyo, ground measurements were performed to calculate the soil resistivity. The short-circuit current is also obtained in 69/13.8 KV buses in the referred substation. Certain calculations were performed to determine resistance of the mesh, wire size, the theoretical length of the grounding mesh, mesh voltages and contact in order to determine safety levels. In the process of building the grounding mesh, connections are made with compression fittings with the new welding rod silver and 45% of the connector side in order to prevent moisture content inlet which would affect over time forming a layer of copper sulfate machined connector and deteriorating the resistance of the mesh. The results have been satisfactory. In a period of ten years, some measurements were conducted to ground connections equipment and metal structures, keeping most measurements under one ohm.*

**Keywords:** grounding mesh, electric substation, earth resistivity, connectors, welding

## 1. Introducción

En el año 2003 la Empresa Eléctrica Los Ríos, procedió a realizar el proyecto de construcción de la Subestación Terminal Terrestre, situado en la ciudad de Babahoyo.

Para realizar las obras civiles, montajes de las estructuras metálicas y montajes de los equipos eléctricos; se requería el estudio de la malla a tierra y posteriormente su construcción.

En el proceso del diseño se requería determinar la resistividad del suelo, los niveles de corto-circuito, cálculos de voltaje de malla, paso y contacto; para determinar si la malla es segura al personal y equipos.

## 2. Normas y parámetros establecidos

La teoría y cálculos realizados están basados en la norma IEEE STD 80-2000.

En la determinación del diseño de la malla se considera los siguientes criterios:

- Resistencia máxima de puesta a tierra: los valores recomendados por el IEEE STD 142-1991 para subestaciones de 69 KV/ 13.8 KV es de 1 a 5 ohmios.
- Calibre de conductor: la selección del conductor se considera 2/0 AWG.
- Profundidad de la malla: 0.5 metros.
- Voltajes permisibles: los valores son calculados bajo la norma IEEE STD 80-2000.
- Distancias entre varillas: la distancia no será menor de tres metros.
- Tipo de conexiones: machinado y soldado con varillas de plata en los lados del conector, para evitar la filtración de la humedad.

## 3. Metodología

El procedimiento a realizar en el diseño de la malla son:

- Determinación de los datos del terreno
- Cálculo de la corriente de corto-circuito

- Tiempo de la duración de la falla.
- Cálculo del factor que depende del dimensionamiento de la malla y el factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.
- Cálculo del calibre del conductor.
- Cálculo de la longitud del conductor.
- Cálculo de la resistencia de la malla.
- Cálculo de las tensiones de malla, paso y contacto.

## 4. Cálculo de la malla

### 4.1 Determinación de los datos del terreno

Para determinar la resistividad del terreno se lo obtiene mediante el método de Wenner o de las cuatro varillas. En la figura 1 se observa esquemáticamente la disposición de los cuatro electrodos.

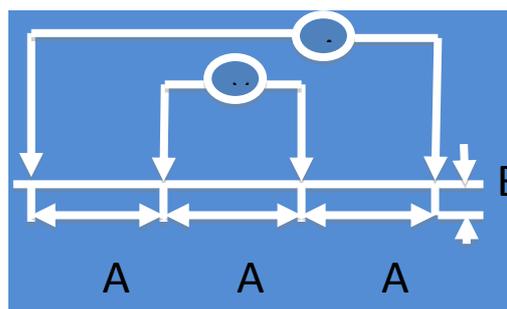


Figura 1. Método Wenner

Se inyecta corriente a través de los electrodos exteriores y se mide el potencial en los electrodos interiores determinándose la resistencia del terreno, aplicando la fórmula simplificada se obtiene la resistividad  $\rho = 2\pi AR$ ; esta medición se realiza en diferentes lugares donde estará ubicada la malla.

Los resultados obtenidos se registran en la tabla 1, el promedio de las mediciones realizadas de la resistividad es de  $\rho = 54.65$  ohmios-metros.

Tabla 1. Mediciones de la resistividad del suelo

Separación (A) Metros	Profundidad (B) Metros	Resistencia Re Ohmios	Resistividad $\rho$ ohmios-mts.
2	0.1	4.20	52.78
2	0.1	4.26	53.53
2	0.1	4.70	59.06
2	0.1	4.30	54.04
2	0.1	4.11	51.65
2	0.1	4.68	56.81

## 4.2 Cálculo de la corriente de corto-circuito

Las corrientes de corto-circuito se la calcula por medio de un programa computacional en sistema operativo D.O.S.; para la simulación se incluyó los datos de nivel de corto-circuito de la Subestación Babahoyo de CELEC(TRANSELECTRIC), además los parámetros de las líneas de subtransmisión a 69 KV y las impedancias de los transformadores de potencia según el diagrama unifilar de la figura 2 de la Empresa Eléctrica Los Ríos.

En el programa se simuló para encontrar las corrientes más críticas en máxima demanda (2003). El resultado para la Subestación Terminal Terrestre en barra de 13.8 KV es 75,1 MVA, es decir,  $I_{cc} = 3146$  amperios.

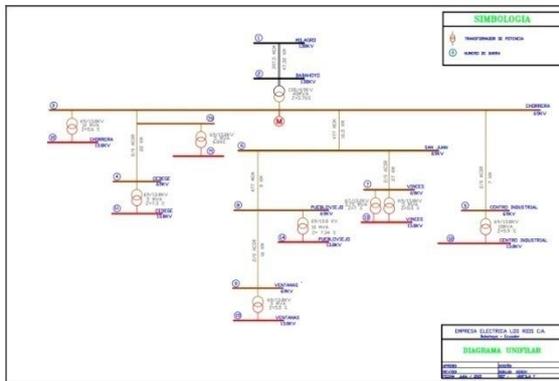


Figura 2. Diagrama Unifilar

## 4.3 Tiempo de duración de la falla

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, tendremos un tiempo de duración de la falla a 0.2 segundos que equivale a 12 ciclos considerando la actuación de los disyuntores y operación de los relés analógicos, por esta razón aplicamos un factor de decremento de 1.23 según la tabla 3, la corriente de corto-circuito  $I_{cc} = 3860$  amperios.

Tabla 2. Valores típicos de decremento

Duración de la falla ciclos	Factor de Decremento
0.5	1.68
6	1.37
12	1.23
30 o más	1.1

## 4.3 Cálculos de los factores Km, Ki, calibre del conductor, longitud del conductor y voltaje de malla, paso y contacto.

Los cálculos de los factores Km, Ki, calibre del conductor, longitud del conductor y voltajes de malla,

paso y contacto, con la resistividad medida del terreno  $\rho = 54,65$  ohmios-metros se lo resume en la tabla 3.

## 5. Resultados

Los valores calculados se indican en la tabla 3

Tabla 3. Valores calculados

<b>Km</b>	<b>0.5183</b>
<b>Ki</b>	1.682
<b>A</b>	10360.86 CM
<b>L</b>	658.10 metros
<b>Rm</b>	1.23 ohmios
<b>Ecm</b>	487.77 voltios
<b>Ept</b>	344.92 voltios
<b>Epr</b>	4955.13 voltios
<b>Ect</b>	280.16 voltios
<b>Ecr</b>	1399.78 voltios
<b>Epasso</b>	513.76 voltios

A continuación se describe el significado de cada valor calculado:

$K_m$  = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

$A$  = Calibre del conductor.

$L$  = Longitud del conductor

$R_m$  = Resistencia de la malla

$E_{cm}$  = Voltaje de contacto de la malla

$E_{pt}$  = Voltaje de paso a tierra

$E_{pr}$  = Voltaje paso a roca

$E_{ct}$  = Voltaje contacto a tierra

$E_{cr}$  = Voltaje contacto a roca

$E_{passo}$  = Voltaje paso de la malla

Analizando el resultado de la tabla 3 se deduce lo siguiente:

$L$  calculada = 658 m. >  $L$  establecida = 398 m

$E_{cm} = 487.77$  v. >  $E_{ct} = 280.16$  v.

$E_{passo} = 513.76$  v. >  $E_{pt} = 344.92$  v.

Las comparaciones en los tres casos, la malla no es segura para el personal operativo. La solución es mejorar el suelo con producto químico como la bentonita para disminuir la resistividad del suelo.

Realizado el tratamiento del suelo y efectuando mediciones el valor de la resistividad disminuyó de 54.65 ohmios-metros a 23.73 ohmios-metros. Procediéndose nuevamente los cálculos obteniéndose los valores según la tabla 4. Se analiza las tres comparaciones anteriores:

$L$  calculada = 298,29 m. <  $L$  establecida = 398 m.

$E_{cm} = 211.80$  v. <  $E_{ct} = 268.40$  v.

$E_{passo} = 223.08$  v. <  $E_{pt} = 296.54$  v.

Se concluye que la malla es segura para el personal operativo y los equipos de la Subestación.

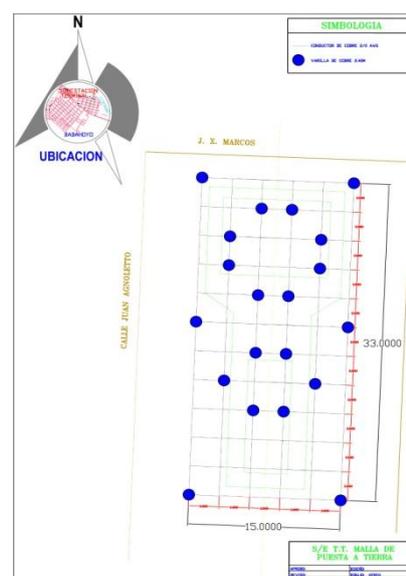
**Tabla 4. Valores Recalculados**

<b>km</b>	0.5183
<b>ki</b>	1.682
<b>A</b>	10360.86 CM
<b>L</b>	298.29 metros
<b>Rm</b>	0.53 ohmios
<b>Ecm</b>	211.80 voltios
<b>Ept</b>	296.54 voltios
<b>Epr</b>	4955.13 voltios
<b>Ect</b>	268.40 voltios
<b>Ecr</b>	1399.78 voltios
<b>Epasso</b>	223.08 voltios

## 6. Conclusiones

A continuación se describen las siguientes conclusiones:

1. En los resultados obtenidos los potenciales son seguros.
2. La resistencia de la malla es menor a la resistencia máxima de la norma IEEE-142-1991.
3. En mediciones periódicas realizadas a las estructuras y equipos en un periodo de 10 años es menor a un ohmio.
4. En el proceso de construcción para realizar las conexiones conductor-conductor y conductor-varilla, se utilizó conectores de compresión. Para evitar las filtraciones de humedad al conector para que no se produzca capade sulfato de cobre, se soldó varillas de plata al 45% en ambos lados del conector.
5. En la zona donde se ubicó la Subestación alrededor no había edificaciones, en la etapa invernal había muchas descargas atmosféricas no se afectándose los equipos instalados por la baja resistencia de la malla.
6. En el esquema de la figura 3 se encuentra el esquema del diseño final.
7. En las futuras ampliaciones de la subestación se recomienda tratar el suelo con producto químico para bajarla resistividad del suelo.
8. Hay que mantener en la superficie del suelo una altura de 15 centímetros la capa de piedra triturada dentro y fuera de la malla.
9. Se recomienda la construcción de las mallas a tierra con conectores de compresión pero realizando la soldadas de varillas de plata, por los excelentes resultados.



**Figura 3. Diseño de la malla a tierra**

## 7. Referencias

- [1] Martín José Raúl, Diseño de Subestaciones Eléctricas, McGraw-Hill, 1987.
- [2] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, IEEE Std 80-2000, <http://www.dee.ufrj.br/~acsl/grad/equipamentos/IEEE-std80.pdf>, fecha de consulta Mayo 2015.