

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN LA  
SUBESTACIÓN TERMINAL TERRESTRE”

**EXAMEN DE GRADO (COMPLEXIVO)**

Previa a la obtención del grado de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN  
POTENCIA**

ALFREDO ROSENDO VERA SANCHEZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2015

## AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a los profesores de la Espol por su esmero y dedicación al impartir el conocimiento para tener agudeza y discernimiento a los diversos problemas que se nos presentan en el campo laboral para dar soluciones inmediatas y a corto plazo.

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Jehová Dios por ser mi guía y apoyo en todo tiempo.

A la memoria de mi madre por el impulso necesario.

A mi esposa e hija por tener ayuda incondicional y aguante.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

**Mag. Angel Recalde**

EVALUADOR

---

**Máster. Douglas Aguirre**

EVALUADOR

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en este Informe me corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Alfredo Vera Sánchez

## RESUMEN

En el diseño de la malla a tierra 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 del cortocircuito en barra de 13.8 KV de la Subestación.

Se realizó los cálculos para determinar: resistencia de la malla, el calibre del conductor, la longitud teórica del conductor, resistencia de la malla a tierra, los voltajes de malla, paso y contacto, con el objeto para concluir si la malla es segura.

En el proceso de construcción de la malla a tierra, las conexiones se realizó con conectores de compresión con la novedad de soldar varilla de plata al 45% a los lados del conector machinado con el propósito de evitar la entrada de la humedad que afectaría con el tiempo la unión de conector- conductor al formarse una capa de sulfatos de cobre, desmejorando la resistencia de la malla.

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios. En un periodo aproximado de 10 años, se realizó algunas mediciones a tierra de las conexiones a los equipos y estructuras metálicas, manteniéndose la mayoría de las mediciones por debajo de un ohmio.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN .....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	x
CAPÍTULO 1 .....	1
1. FUNCIONES DE LA MALLA A TIERRA .....	1
1.1 Normas. ....	1
1.2 Parámetros establecidos .....	2
1.3 Metodología .....	3
1.4 Cálculo del sistema malla a tierra .....	3
1.4.1 Determinacion de datos en el terreno .....	3
1.4.2 Cálculo de corriente de corto-circuito .....	6
1.4.3 Teimpo de duración de la falla .....	6
1.4.4 Cálculo de los factores $K_m$ y $K_i$ .....	7
1.4.5 Cálculo de calibre del conductor de la malla .....	8
1.4.6 Cálculo del conductor de la malla .....	9
1.4.7 Cálculo de la resistencia de la malla.....	10
1.4.8 Cálculo de los voltajes tolerables de malla, paso y contacto .....	10
CAPÍTULO 2.....	15
2. RESULTADOS OBTENIDOS.....	15
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	18
BIBLIOGRAFÍA.....	21
ANEXOS.....	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Método Wenner.....	5
-------------------------------	---

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	Valores típicos de decremento .....	7
TABLA 2	Valores calculados .....	15
TABLA 3	Valores calculados con el suelo mejorado.....	17

## 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 en las calles Juan Agnolecto y Juan X Marcos.

La Empresa Eléctrica responsabilizó al departamento técnico la construcción de las obras civiles, las estructuras metálicas para el barraje de 69 KV y el barraje de 13,8 KV. La supervisión y ejecución del montaje electro-mecánico, pruebas eléctricas la realizó el personal de la sección de subestaciones.

Los equipos como reconectores trifásicos, transformador de potencia de 5 MVA de 69 KV/13.8 KV, seccionadores accionado en grupo de 69 KV, seccionadores monopolares de 13.8 KV y perfiles para estructuras del barraje de 13.8 KV fueron entregados y financiados por el proyecto Belga- INECEL.

Antes de realizar las obras civiles y el montaje de los equipos se requería realizar el estudio y construcción de la malla a tierra para la protección de los equipos, transformador de potencia y principalmente al personal operativo.

En el primer capítulo se describe el propósito de la malla: proteger al personal operativo de la subestación y los equipos en caso de presentarse un evento de falla como son las descargas atmosféricas o pérdida de aislamiento.

Para realizar la teoría y los cálculos se utilizó la norma IEEE STD 80-2000.

Posteriormente se describe el método y las pruebas eléctricas para determinar la resistividad del suelo en el terreno donde se instalarían los equipos y transformador de potencia de la subestación.

Mediante un programa de computación en sistema operativo DOS se obtuvo el nivel de corto-circuito en barra de 13.8 KV.

En el capítulo dos se indica los resultados obtenidos, se determinó la sección de conductor teórico, resistencia de la malla y cálculos de los potenciales tolerables al cuerpo humano.

En las conclusiones y recomendaciones se determinará si la malla a tierra es segura, además por tiempo transcurrido, aproximadamente diez años, se mantiene baja la resistencia de la malla, al implementar se añadió una novedad que evitó que hubiera sulfato de cobre en las conexiones, el cual sería el causante de aumento de resistencia de la malla.

## **CAPÍTULO 1**

### **1. FUNCIONES DE LA MALLA A TIERRA**

El propósito de la malla a tierra es proteger al personal que opera las subestaciones y proteger los equipos, es decir, garantizar la continuidad del Sistema Eléctrico. Los propósitos para los cuales es diseñado y construidos un sistema de puesta a tierra son:

- Garantizar baja resistencia a tierra para disminuir el máximo potencial a tierra.
- Garantizar conducción a tierra de cargas estáticas o inducidas, descargas atmosféricas o corrientes de corto-circuitos.
- Garantizar niveles de potencial seguros entre las estructuras metálicas de los equipos energizados. Para seguridad de las personas que puedan tocar estas estructuras.

- Garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos de protección asociados a los sistemas para aislar rápidamente las fallas que puedan presentarse en la operación.
- En 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.

### 1.1 Normas

La teoría y cálculos realizados, están basados en la siguiente norma:

- IEEE STD 80-2000 guía para protección de tierras en subestaciones.

### 1.2 Parámetros Establecidos

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**

La profundidad de la malla será a 0.5 metros.

- **Voltajes máximos permisibles**

Los valores son calculados bajo la norma IEEE STD 80-2000

- **Distancia entre varillas**

La distancia entre varillas no será menos de tres metros. Distancias menores a 2.4 metros provoca interferencias entre los gradientes de potencial reduciendo la efectividad de las varillas.

- **Tipo de Conexiones**

El tipo de conexiones será maquinado y soldado con varillas de platas en los lados del conector, para evitar la filtración de humedad.

### **1.3 Metodología**

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

- Determinación de datos en el terreno.
- Cálculo de corrientes de corto-circuito.
- Tiempo de 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 resistencia de la malla.
- Cálculo de las tensiones de malla, paso y contacto

### **1.4 Cálculo del Sistema Malla a tierra**

#### **1.4.1 Determinación de los datos en el terreno**

Para determinar la resistividad se considera los siguientes pasos:

Determinación del área con el fin de ubicar los ejes y:

- Las longitudes del terreno.
- Verificación de la uniformidad del terreno.
- Condiciones climáticas y físicas del terreno.

La resistividad del suelo se lo obtiene mediante el método Wenner o de las cuatro varillas. En la figura 1.1 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente ecuación 1.1 [2]:

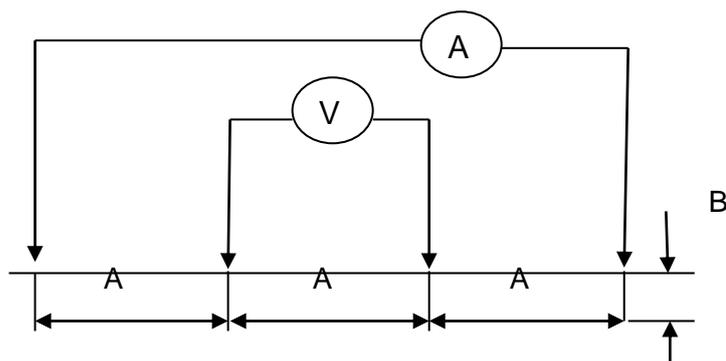
$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (1.1)$$

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). Es decir,  $A > 20B$ , la siguiente ecuación simplificada 1.2 se puede aplicar [2]:

$$\rho = 2\pi AR \quad (1.2)$$

Se procederá a tomar lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras. De las mediciones obtenidas se sumó y se promedió.

El resultado obtenido se describe en el reporte anexo 2 de la medición de la resistividad y en el soporte gráfico de la resistividad del terreno.



**Figura 1.1: Método Wenner.**

Para obtener la resistividad del terreno se utilizó el equipo medidor digital de puesta tierra marca AEMC modelo 4500, en la tabla anexo 3 se indica los datos obtenidos. Para determinar se utilizó el método Wenner o las cuatro varillas se midió la resistencia del suelo manteniendo la distancia de dos metros entre varillas y midiendo en seis diferentes sitios dentro del área donde se tenía proyectado la construcción de la malla. El promedio de las mediciones efectuadas según anexo 2 fue de  $\rho = 54,65$  ohmios-metros. Posteriormente la empresa adquirió otro equipo marca MEGGER tipo DT4TCR2 procediendo a confirmar los valores medidos de la resistividad en el año 2003 según anexo 3. En la misma área del terreno registrando las mediciones en el eje horizontal (HH') con respecto al mayor lado del terreno y (VV') vertical con respecto al menor lado, variado de la distancia(A) entre varillas, posteriormente se obtuvo el promedio de las mediciones realizadas en cada eje, luego se sumó y se promedió determinándose el valor de la resistividad del suelo es:  $\rho = 57,04$  ohmios-metros. El valor de la resistividad de la capa en superficie del suelo donde se coloca piedra triturada determinada en la tabla [2] es:  $\rho_s = 3000$  ohmios-metros.

### **1.4.2 Cálculos de corriente de corto-circuito**

Para determinar las corrientes de corto-circuito se lo hizo en base de un programa en sistema operativo D.O.S de la Empresa Eléctrica Los Ríos C.A, se incluyó los datos del CENACE en barra de 69 KV de la subestación de Babahoyo CELEC (Transelectric) (2003), así también los datos de las impedancias líneas de subtransmisión, y datos de los transformadores de potencia según diagrama unifilar del anexo 6 para obtener los niveles de corto-circuitos en barra de 69 KV y 13,8 KV.

En el programa se simuló para encontrar las corrientes más críticas en máxima demanda (2003); en el anexo 1 encontramos los resultados de los MVA corto-circuito a tierra en barra de 13,8 KV la subestación Terminal Terrestre en proyecto, en la página 27 del anexo 1 se determina el valor de 75.1 MVA (2003); calculando la corriente de corto-circuito:  $I_{cc} = 3146$  amperios.

### **1.4.3 Tiempo de duración de la falla**

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, lógicamente 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 1.23 según la Tabla 1 [2]:

Duración de la falla ciclos	Factor de Decremento
.05	1.68
6	1.37
12	1.23
30 o más	1.1

Tabla 1: Valores típico de decremento

Por consiguiente la corriente de corto-circuito con el factor de decremento es

$$I_{cc} = 3146 (1.23) = 3870 \text{ amperios.}$$

#### 1.4.4 Cálculo de los factores $K_m$ y $K_i$

Para determinar la longitud del conductor se calcula  $K_m$  a partir de la ecuación 1.3 [1]:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{D^2}{16 h d} \right] + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \dots \frac{(2n-3)}{(2n-2)} \right] \quad (1.3)$$

Donde:

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

$D$  = Espaciamiento entre conductores en la malla

$d$  = Diámetro de los conductores

$h$  = Profundidad

$n$  = Número de conductores transversales paralelos

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{3^2}{16 * 0.5 * 0.0105} \right] + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \frac{9}{10} \right]$$

$$k_m = 0.5183$$

### Cálculo de $K_i$

Para determinar el factor  $K_i$  se utiliza la ecuación 1.4 [1]:

$$K_i = 0.65 + 0.172 * n \quad (1.4)$$

$K_i$  = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra

$n$  = Número de conductores transversales paralelos

$$K_i = 0.65 + 0.172 * 6$$

$$K_i = 1.682$$

### 1.4.5 Cálculo del calibre del conductor de la malla

Los elementos que componen la malla del sistema a tierra, como conductor de la malla, conexiones y electrodos, deberán cumplir lo siguiente:

- Las uniones eléctricas para que no se funden o deterioren en las condiciones más desfavorables de magnitud y duración de la corriente de la falla.
- Los elementos sean mecánicamente resistentes.
- Tengan suficiente conductividad para que no contribuyan apreciablemente a producir diferencias de potencial locales.

La ecuación permite seleccionar el conductor cobre y la unión adecuados para evitar la fusión del conductor, según la ecuación 1.5 [1]:

$$I = A \sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right) + 1}{33t}} \quad (1.5)$$

En donde:

I = Corriente en Amperios

A = Sección de cobre, en circulas mils

t = Tiempo durante el cual circula la corriente I, en segundos

T<sub>m</sub> = Temperatura máxima permisible, en grados centígrados

T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente, en grados centígrados

Valores considerados:

T<sub>a</sub> = 30 grados centígrados

T<sub>m</sub> = 250 grados centígrados permisibles para las uniones con conectores

Despejando A de la ecuación 1.5 obtenemos la ecuación 1.6:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right) + 1}{33t}}} \quad (1.6)$$

$$A = \frac{3870}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{250-30}{234+30}\right) + 1}{33 * 0.2}}}$$

$$A = 10360.86 \text{ CM}$$

#### 1.4.6 Cálculo de la longitud del conductor de la malla

A partir de la ecuación 1.7 [1]:

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho} \quad (1.7)$$

Donde:

L = Longitud calculada del conductor para mantener el voltaje de malla

K<sub>m</sub> = Factor que depende del dimensionamiento de la malla

K<sub>i</sub> = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra

ρ = Resistividad del terreno

t = Duración máxima de la falla

ρ<sub>s</sub> = Resistividad en la superficie del terreno

$$L = \frac{0.5183 * 1.682 * 54.65 * 3870 * \sqrt{0.2}}{116 + 0.17 * 54.65}$$

$$L = 658,10 \text{ metros.}$$

#### 1.4.7 Cálculo de la resistencia de la malla

Para hacer el cálculo de la resistencia de la malla se lo realiza mediante el método de Laurent y Niemann, que es bastante aproximado, la expresión de la ecuación 1.8 [2]:

$$R_m = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad (1.8)$$

ρ = Resistividad del suelo

A= Área total de la malla

L= Longitud total de la malla

$$R_m = \frac{54.65}{4} \sqrt{\frac{\pi}{495}} + \frac{54.65}{378}$$

$$R_m = 1.23 \Omega$$

#### 1.4.8 Cálculos de los voltajes tolerables de malla, paso y contacto

Se procederá a realizar los cálculos de los potenciales de contacto de malla, paso y contacto.

- **Cálculo del potencial de contacto de la malla**

Empleamos la ecuación 1.9 [1]:

$$E_{cm} = \frac{K_m K_i \rho I_{cc}}{L} \quad (1.9)$$

Donde:

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

L = Longitud de conductor enterrado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad

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

$K_i$  = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra

$\rho$  = Resistividad del terreno

$I_{cc}$  = Corriente de corto circuito monofásica en Amperios

$$E_{cm} = \frac{0.5183 * 1.682 * 54.65 * 3870}{378}$$

$$E_{cm} = 487.77 \text{ voltios}$$

- **Cálculo del potencial paso-tierra**

Se determina mediante la ecuación 1.10 [1]:

$$E_{pt} = \frac{116 + 0.7 \rho}{\sqrt{t}} \quad (1.10)$$

$E_{pt}$  = Potencial de paso-tierra

$\rho$  = Resistividad del suelo

$t$  = Duración máxima de la falla

$$E_{pt} = \frac{116 + 0.7 * 54.65}{\sqrt{0.2}}$$

$$E_{pt} = 344.92$$

- **Cálculo del potencial de Paso**

Potencial soportable por el cuerpo humano voltaje de paso-roca según ecuación 1.11 [1]:

$$E_{pr} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (1.11)$$

$E_p$  = Voltaje tolerable para el cuerpo humano

$t$  = Duración máxima de la falla

$\rho_s$  = Resistividad en la superficie del terreno

$$E_{pr} = \frac{116 + 0.7 * 3000}{\sqrt{0.2}}$$

$$E_{pr} = 4955.13 \text{ voltios}$$

- **Cálculo de potencial contacto-tierra**

Se calcula a partir de la ecuación 1.12 [1]:

$$E_{ct} = \frac{116 + 0.17 \rho}{\sqrt{t}} \quad (1.12)$$

$E_{ct}$  = Potencial de contacto a tierra

$t$  = Duración máxima de la falla

$\rho$  = Resistividad del suelo

$$E_{ct} = \frac{116 + 0.17 * 54.65}{\sqrt{0.2}}$$

$$E_{ct} = 280.16 \text{ voltios}$$

- **Cálculo del potencial contacto/ roca**

Se calcula a partir de la ecuación 1.13 [1]:

$$E_{cr} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (1.13)$$

$E_{cr}$  = Potencial de contacto/ roca

$t$  = Duración máxima de la falla

$\rho_s$  = Resistividad de la superficie del suelo

$$E_{cr} = \frac{116 + 0.17 * 3000}{\sqrt{0.2}}$$

$$E_{cr} = 1399.78 \text{ voltios}$$

- **Cálculo del potencial de paso fuera del perímetro de la malla**

Se calcula a partir de la ecuación 1.14 [1]:

$$E_{\text{paso}} = \frac{K_s * K_i * \rho * I_{cc}}{L} \quad (1.14)$$

$K_s$  = Coeficiente que toma en cuenta el efecto de número de conductores de la malla, el espaciamiento  $D$  y la profundidad de enterramiento  $h$

$K_i$  = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra

$\rho$  = Resistividad del suelo

$I_{cc}$  = Corriente de corto circuito monofásica en Amperios

$L$  = Longitud de conductor enterrado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad

Se determinará  $K_s$  a partir de la ecuación 1.15 [1]:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \dots + \frac{1}{(N-1)D} \right] \quad (1.15)$$

$h$  = Profundidad de enterramiento

$D$  = Espaciamiento entre conductores

$N$  = Números de conductores paralelos (lado largo)

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2*0.5} + \frac{1}{3+0.5} + \frac{1}{2*3} + \frac{1}{2*4} + \frac{1}{2*5} \right]$$

$K_s = 0.5459$

$$E_{\text{paso}} = \frac{0.5459 * 1.682 * 54.65 * 3870}{378}$$

$E_{\text{paso}} = 513.76$  voltios

## CAPÍTULO 2

### 2. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se resumen los 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

**Tabla 2: Valores calculados**

Analizando los resultados de la tabla 2 se resumen en lo siguiente:

- La sección del conductor seleccionado 2/0 AWG es mayor al calculado.
- La longitud total del conductor enterrado de la malla es menor a la longitud teórica calculada.

$$L_t = 658,1 \text{ m} > L = 378 \text{ m}$$

- La resistencia de la malla es menor según las normas que es de 5 ohmios como máximo.
- Para el desplazamiento del personal debe cumplirse:  
 $E_{\text{paso}} = 513.76 \text{ voltios} < E_{\text{paso/roca}} = 4955.13 \text{ voltios}$   
 $E_{\text{malla}} = 487.77 < E_{\text{contacto/roca}} = 1399.77 \text{ voltios}$
- El potencial de la malla  $E_m$  es mayor a potencial  $E_{\text{contacto/tierra}}$ , esto nos indica que no hay seguridad para el personal y la solución es disminuir la resistividad del suelo, para el efecto se debe agregar aditivos químicos como bentonita para el mejoramiento del suelo; algunos fabricantes según catálogos indican que hay una reducción del 90% de la resistividad.

Una vez tratado el suelo, en el mejor de los casos se reduce de 54.65 ohmios-metros a 23.73 ohmios- metros, volviendo a calcular los parámetros obtendríamos que el potencial de malla sería menor al potencial contacto-tierra, es decir:

$$E_m = 211.80 \text{ voltios} < E_{\text{contacto/tierra}} = 268.4 \text{ voltios}$$

A continuación se determina los valores de los parámetros siguiendo el mismo procedimiento con la tierra mejorada según la Tabla 3:

<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

Tabla 3: Valores calculado con el suelo mejorado

Los valores obtenidos se determina que los potenciales en la malla dentro y afuera son seguros para el personal y los equipos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. En los resultados obtenidos los potenciales son seguros al bajar la resistividad del suelo aplicando aditivos químicos.
2. La resistencia calculada y medida está por debajo de la máxima resistencia que indican las normas.

En la medición realizada en el año 2003 mediante el probador digital marca AEMC 4500 nos dio un valor de la resistencia de malla  $R_m = 0.48$  ohmios-metros. También se registro en el equipo la medición de la resistividad del suelo 23.73 ohmios-metros.

Posteriormente se realizó pruebas periódicas manteniéndose en la mayoría de los equipos y estructura por debajo de 1 ohmio, los datos registrados están en el Anexo 4 y las fotos de las pruebas realizadas en Diciembre 2013.

3. En el proceso de construcción se utilizó conectores de compresión para conectar conductor-conductor y conductor-varilla, para evitar los sulfatos de cobre en las conexiones, se fundió varilla de plata al 45% a los lado de cada conector; dando buenos resultados como lo demuestra por el tiempo transcurrido teniendo en consideración que el nivel freático del suelo es alto en los meses de invierno, manteniéndose la resistencia de la malla en valores menores a 1 ohmio.
4. En la zona donde se estableció la subestación Terminal Terrestre no habían edificaciones en el año 2003, por lo que en tiempo de invierno hubieron muchas descargas atmosféricas, no afectándose los equipos, el transformador de potencia por la baja resistencia de la malla.
5. En el Anexo 7 se encuentra el diseño de la malla con la ubicación de las varillas de cobre.
6. En anexo 5 están los presupuestos de la malla con conectores de compresión y el presupuesto con soldadura exotérmica. Se observa una ligera diferencia en los costos pero es conveniente la conexión con conectores porque se demuestra que la resistencia de la malla en 10 años casi no se ha afectado, es más rápido en la construcción de la malla y a diferencia con conectores emperrados no se afecta por la vibración del terreno.

### **Recomendaciones**

1. En las futuras ampliaciones de la subestación Terminal Terrestre por aumento de capacidad de transformación y la instalación de nuevos equipos se deberá

hacer un mejoramiento del suelo con aditivos químicos como bentonita para mejorar la resistividad.

2. Hay que mantener en el interior y exterior de la malla con capa de piedra triturada en una altura de 10 a 15 cm del suelo para aumentar la seguridad del personal de mantenimiento y operativo. Además realizar la limpieza de malezas cada seis meses.
3. Periódicamente se debe realizar mediciones de la resistencia a tierra en los diversos equipos y en las estructuras metálicas.
4. Se recomienda aplicar la construcción de malla con conectores de compresión aplicando soldaduras en cada lado de los conectores en las nuevas subestaciones por los excelentes resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

[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

# ANEXOS

## ANEXO 1

La simulación se realiza para demanda máxima con parámetros del 2003

1EMPRESA ELECTRICA LOS RIOS

12-04-03

PAGE 1

```

0
0          CORTO CIRCUITO SISTEMA 05 DICIEMBRE 2003          COMENTARIO
1  ADDED
0          DEMANDA MAXIMA SIN GENERADORES Y CON S/E TERMINAL TERRESTRE  COMENTARIO
2  ADDED
1EMPRESA ELECTRICA LOS RIOS          12-04-03
PAGE 2
0
-

```

LINE DATA (PERCENT Z)									
0	TYPE	FROM BUS	TO BUS	CKT	R1	X1	R0	X0	LINE NAME
ADDITION		0	1	0	7.53	26.57	1.53	20.46	SNI
ADDITION		1	70	0	7.39	7.49	11.01	19.03	TTE
ADDITION		70	2	0	18.30	18.53	27.26	47.10	CDG
ADDITION		2	11	0		146.00	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	11	0	9999.99	9999.99		146.00	
ADDITION		70	71	0		110.00	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	71	0	9999.99	9999.99		110.00	
ADDITION		1	46	0		74.00		74.00	
ADDITION		46	10	0		-27.00		-27.00	
ADDITION		0	46	0	9999.99	9999.99		32.90	
ADDITION		46	47	0		32.90	9999.99	9999.99	
ADDITION		1	6	0	4.64	14.96	14.08	45.05	
ADDITION		6	8	0	2.53	8.16	7.68	24.57	
ADDITION		8	9	0	18.68	18.92	27.83	48.09	
ADDITION		8	14	0		73.40	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	14	0	9999.99	9999.99		73.40	
ADDITION		9	15	0		110.00	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	15	0	9999.99	9999.99		110.00	
ADDITION		6	7	0	31.53	31.93	46.97	81.16	
ADDITION		7	13	0		110.00	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	13	0	9999.99	9999.99		110.00	
ADDITION		7	13	0		186.67	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	13	0	9999.99	9999.99		186.60	
ADDITION		1	5	0	8.17	8.28	12.17	21.04	
ADDITION		5	12	0		59.00	9999.99	9999.99	
ADDITION		0	12	0	9999.99	9999.99		59.00	

1EMPRESA ELECTRICA LOS RIOS

12-04-03

PAGE 3

BUS DATA			
0	TYPE	BUS	NAME
ADDITION		1	CHORRERA 69
ADDITION		2	CDG 69 KV
ADDITION		5	CENTRO INDUS
ADDITION		6	SAN JUAN 69
ADDITION		7	VINCES 69
ADDITION		8	PUEBLO VIEJO
ADDITION		9	VENTANAS 69
ADDITION		70	TERMINAL TER
ADDITION		10	CHORRERA 13.
ADDITION		11	CDG 13.8
ADDITION		12	CENTRO IND 1
ADDITION		13	VINCES 13.8
ADDITION		14	PUEBLO VIEJO
ADDITION		15	VENTANAS 13.
ADDITION		46	FICTICIO
ADDITION		47	TERCIARIO
ADDITION		71	TERMINAL TER



```

-
F A U L T-----X
X-----B U S   F A U L T (LINE OPEN)-----X X-----L I N E   E N D
X-----10-G   FAULT-----X X-30   FAULT-X X-----10-G   FAULT-----
+
/
/
/
Q BUS VOLTS X--MVA FLOWS--X Q BUS MVA Q BUS VOLTS X--MVA
E1 E0 2I1+I0 I0 VOLTS FLOW E1 E0 2I1+I0
IO VOLTS FLOW
0 NO L I N E S O U T
+
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X
MAGNITUDES
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES
BUS NAME BUS NAME I.D.
6 SAN JUAN 69 1 CHORRERA 69 1 .817 .114 199.2 66.4 .362 231.1
.14 11.61 -74.79 -74.79 -.90 -73.66
6 SAN JUAN 69 8 PUEBLO VIEJO 1 .713 .425 .0 .0 .000 .0
.45 1.52 .00 .00 .00 .00
6 SAN JUAN 69 7 VINCES 69 1 .713 .425 .0 .0 .000 .0
.45 1.52 .00 .00 .00 .00
0-----
0 NO L I N E S O U T
+
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X
MAGNITUDES
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES
BUS NAME BUS NAME I.D.
7 VINCES 69 6 SAN JUAN 69 1 .870 .196 91.9 30.6 .525 117.0
-1.65 13.56 -62.75 -62.75 -13.89 -59.25
7 VINCES 69 13 VINCES 13.8 1 .739 .000 .0 .0 .000 .0
1.24 .00 .00 .00 .00 .00
7 VINCES 69 13 VINCES 13.8 1 .739 .000 .0 .0 .000 .0
2 1.24 .00 .00 .00 .00
0-----
0 NO L I N E S O U T
+
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X
MAGNITUDES
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES
BUS NAME BUS NAME I.D.
8 PUEBLO VIEJO 6 SAN JUAN 69 1 .776 .331 155.1 51.7 .165 193.0
.19 1.98 -74.33 -74.33 -.74 -73.52
8 PUEBLO VIEJO 9 VENTANAS 69 1 .732 .464 .0 .0 .000 .0
.30 .93 .00 .00 .00 .00
8 PUEBLO VIEJO 14 PUEBLO VIEJO 1 .732 .000 .0 .0 .000 .0
1 .30 .00 .00 .00 .00
0-----
1EMPRESA ELECTRICA LOS RIOS 12-04-03
PAGE 7
+
FAULT STUDY, 10-G R+JX
+
/
-
X-----B U S   F A U L T (LINE OPEN)-----X X-----L I N E   E N D
F A U L T-----X
X-----10-G   FAULT-----X X-30   FAULT-X X-----10-G   FAULT-----
+
/
/
/
Q BUS VOLTS X--MVA FLOWS--X Q BUS MVA Q BUS VOLTS X--MVA
E1 E0 2I1+I0 I0 VOLTS FLOW E1 E0 2I1+I0
IO VOLTS FLOW
0 NO L I N E S O U T
+
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X
MAGNITUDES
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES
BUS NAME BUS NAME I.D.
9 VENTANAS 69 8 PUEBLO VIEJO 1 .827 .303 101.2 33.7 .348 131.1
-1.45 8.60 -66.66 -66.66 -18.69 -64.05
9 VENTANAS 69 15 VENTANAS 13. 1 .743 .000 .0 .0 .000 .0
.90 .00 .00 .00 .00 .00
0-----
0 NO L I N E S O U T
+

```

```

(CHORRERA 13.) TOTAL MVA E1 E0 Z1(PU) Z0(PU) TOTAL MVA
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X +-----+
MAGNITUDES 206.4 .491 .018 .7395 .0260 135.2
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES -84.01 -.15***** 84.15 -87.74 -84.15
BUS NAME BUS NAME I.D.
10 CHORRERA 13. 46 FICTICIO
.307 .168 206.4 68.8 .365 135.2
1 -3.86 5.75 -84.01 -84.01-174.15 -84.15

```

```

0-----
+
0 N O L I N E S O U T +---11---X---+ X-----10-G FAULT-----X 30 FAULT
/

```

```

(CD G 13.8 ) TOTAL MVA E1 E0 Z1(PU) Z0(PU) TOTAL MVA
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X +-----+
MAGNITUDES 54.8 .633 .267 2.0135 1.4600 49.7
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES -83.03 1.47 6.97 80.50 90.00 -80.50
BUS NAME BUS NAME I.D.
11 CDG 13.8 2 CDG 69 KV
.899 .000 36.5 .0 .725 49.7
1 3.10 .00 -83.03 .00 9.50 -80.50
11 CDG 13.8 0 REFERENCEBUS
1.000 .000 18.3 18.3 1.000 .0
1 .00 .00 -83.03 -83.03 .00 .00

```

```

1EMPRESA ELECTRICA LOS RIOS 12-04-03
PAGE 8
+
FAULT STUDY, 10-G R+JX
+
0
-
F A U L T-----X X-----B U S F A U L T (LINE OPEN)-----X X-----L I N E E N D
X-----10-G FAULT-----X X-30 FAULT-X X-----10-G FAULT-----
--X X-30 FAULT-X
+
/

```

```

Q BUS VOLTS X--MVA FLOWS--X Q BUS MVA Q BUS VOLTS X--MVA
E1 E0 2I1+I0 I0 VOLTS FLOW E1 E0 2I1+I0
FLOWS--X Q BUS MVA
I0 VOLTS FLOW
0 N O L I N E S O U T +---12---X---+ X-----10-G FAULT-----X 30 FAULT
+
(CENTRO IND 1) TOTAL MVA E1 E0 Z1(PU) Z0(PU) TOTAL MVA
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X +-----+
MAGNITUDES 120.6 .618 .237 .9515 .5900 105.1
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES -82.75 1.39 7.25 80.50 90.00 -80.50
BUS NAME BUS NAME I.D.
12 CENTRO IND 1 5 CENTRO INDUS
.854 .000 80.4 .0 .620 105.1
1 3.02 .00 -82.75 .00 9.50 -80.50
12 CENTRO IND 1 0 REFERENCEBUS
1.000 .000 40.2 40.2 1.000 .0
1 .00 .00 -82.75 -82.75 .00 .00

```

```

0-----
+
0 N O L I N E S O U T +---13---X---+ X-----10-G FAULT-----X 30 FAULT
+
(VINCES 13.8 ) TOTAL MVA E1 E0 Z1(PU) Z0(PU) TOTAL MVA
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X +-----+
MAGNITUDES 82.2 .592 .190 1.4922 .6920 67.0
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES -76.15 2.19 13.85 72.97 90.00 -72.97
BUS NAME BUS NAME I.D.
13 VINCES 13.8 7 VINCES 69
.779 .000 34.5 .0 .464 42.2
1 5.01 .00 -76.15 .00 17.03 -72.97
13 VINCES 13.8 0 REFERENCEBUS
1.000 .000 17.2 17.2 1.000 .0
1 .00 .00 -76.15 -76.15 .00 .00
13 VINCES 13.8 7 VINCES 69
.779 .000 20.3 .0 .464 24.8
2 5.01 .00 -76.15 .00 17.03 -72.97
13 VINCES 13.8 0 REFERENCEBUS
1.000 .000 10.2 10.2 1.000 .0
2 .00 .00 -76.15 -76.15 .00 .00

```

```

0-----
+
0 N O L I N E S O U T +---14---X---+ X-----10-G FAULT-----X 30 FAULT
+
(PUEBLO VIEJO) TOTAL MVA E1 E0 Z1(PU) Z0(PU) TOTAL MVA
X-----C O N T R I B U T I O N S-----X +-----+
MAGNITUDES 93.5 .614 .229 1.2397 .7340 80.7
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT
ANGLES -84.74 .98 5.26 83.19 90.00 -83.19
BUS NAME BUS NAME I.D.
14 PUEBLO VIEJO 8 PUEBLO VIEJO
.842 .000 62.3 .0 .592 80.7
1 2.14 .00 -84.74 .00 6.81 -83.19
14 PUEBLO VIEJO 0 REFERENCEBUS
1.000 .000 31.2 31.2 1.000 .0
1 .00 .00 -84.74 -84.74 .00 .00

```

```

1EMPRESA ELECTRICA LOS RIOS 12-04-03
PAGE 9

```



```

                                1 .87 .00 .00 .00 .00 .00
0-----
-----
0      NO LINES OUT          +---71---X---+ X-----10-G FAULT-----X 30 FAULT
+
X-----CONTRIBUTIONS-----X (TERMINAL TER) TOTAL MVA E1 / E0 Z1 (PU) Z0 (PU) TOTAL MVA
MAGNITUDES +-----+ 75.1 .637 .276 1.4483 1.1000 69.0
X-----P BUS-----X X-----Q BUS-----X CKT -85.71 .93 4.29 84.08 90.00 -84.08
ANGLES
BUS NAME BUS NAME I.D.
71 TERMINAL TER 70 TERMINAL TER 1 .913 .000 50.1 .0 .760 69.0
71 TERMINAL TER 0 REFERENCEBUS 1 1.94 .00 -85.71 .00 5.92 -84.08
71 TERMINAL TER 0 REFERENCEBUS 1 1.000 .000 25.0 25.0 1.000 .0
71 TERMINAL TER 0 REFERENCEBUS 1 .00 .00 -85.71 -85.71 .00 .00
0-----
-----

```

## ANEXO 2

Valores obtenidos de las pruebas realizadas en diferentes lugares en el área de ubicación de la subestación.

Equipo Digital Modelo 4500 Marca AEMC

SEPARACION (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

Promedio de  $\rho$  = 54.65 ohmios – mts.



**ANEXO 3**

Reporte de las mediciones realizada en el terreno año 2013

Valores obtenidos de las pruebas realizadas en eje horizontal

<b>SEPARACION (A) Metros</b>	<b>PROFUNDIDAD (B) Metros</b>	<b>RESISTENCIA Re Ohmios</b>	<b>RESISTIVIDAD <math>\rho</math> ohmios-mts.</b>
3	0.12	4	75.40
4	0.12	0.63	15.83
5	0.12	3	94.25
6	0.12	3	113.10
PROMEDIO			74.65

Valores obtenidos de las pruebas realizadas en eje vertical

<b>SEPARACION (A) Metros</b>	<b>PROFUNDIDAD (B) Metros</b>	<b>RESISTENCIA Re Ohmios</b>	<b>RESISTIVIDAD <math>\rho</math> ohmios-mts.</b>
3	0.12	1.90	35.81
4	0.12	4	100.53
5	0.12	0.44	13.82
6	0.12	0.20	7.54
PROMEDIO			39.43

Promedio de  $\rho = (74.65 + 39.43)/2 = 57.04$  OHMIOS – MTS.

Soporte gráfico de la resistividad del terreno en eje horizontal



Foto 1: Separación tres m.



Foto 2: Separación seis m.

Soporte gráfico de la resistividad del terreno en eje vertical



Foto 3: Separación tres m.



Foto 4: Separación 6 m.

**ANEXO 4**

Valores periódicos medidos en la subestación Terminal Terrestre

<b>FECHA 09 – 06 -2007 MEDICIONES</b>	<b>RESISTENCIA (OHMIOS) EN ESTRUCTURAS DEL PATIO 69 KV</b>	<b>RESISTENCIA (OHMIOS) EN ESTRUCTURAS DEL PATIO 13.8 KV</b>	<b>TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 5 MVA 69 KV/13.8 KV</b>
1	0.094 $\Omega$		
2	0.287 $\Omega$		
3	0.060 $\Omega$		
4	0.229 $\Omega$		
5		0.151 $\Omega$	
6		0.122 $\Omega$	
7		0.198 $\Omega$	
8		0.056 $\Omega$	
9			0.064 $\Omega$

<b>FECHA 11 - 2013 MEDICIONES</b>	<b>RESISTENCIA (OHMIOS) EN ESTRUCTURAS DEL PATIO 69 KV</b>	<b>RESISTENCIA (OHMIOS) EN ESTRUCTURAS DEL PATIO 13.8 KV</b>	<b>TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 5 MVA 69 KV/13.8 KV</b>
1	0.180 $\Omega$		
2	1.127 $\Omega$		
3	0.100 $\Omega$		
4			
5		0.13 $\Omega$	
6			
7			
8			
9			0.170 $\Omega$

Pruebas periódicas realizadas en la malla existente



Foto 5: Prueba periódica realizada en la estructura metálica de 13.8 KV



Foto 6: Prueba realizada en conexión al transformador de potencia



Foto 7: Prueba realizada a unas de las torres metálicas de 69 KV



Foto 8: Prueba realizada en otras de las bases de la estructura de 69 KV

## Anexo 5

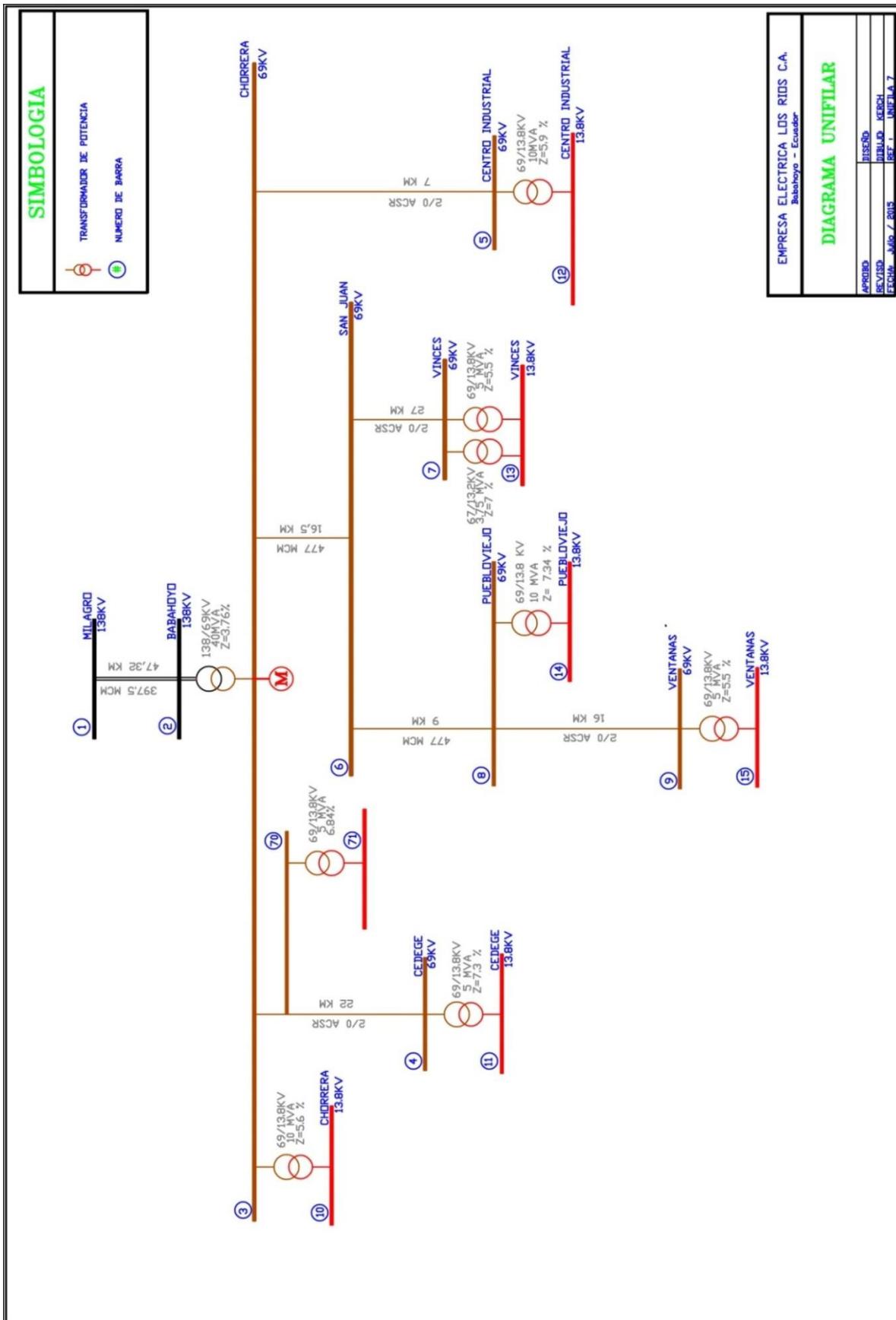
Presupuesto de la malla con conectores de compresión

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/ UN.	COSTO/ TOTAL
<b>Cable Cu desnudo 19 h. # 4/0 AWG</b>	Mts.	448	25.70	11,513.6
<b>Cable desnudo 19h. #2/0 AWG</b>	Mts.	120	15.79	1894.8
<b>Varilla puesta a tierra 5/8" de 2.40 mts</b>	u/c	18	18	324
<b>Conectores de compresión de Cu 2/0</b>	u/c	125	14	1750
<b>Varilla para soldar al 45 % de Ag</b>	u/c	250	1.25	312
<b>Cable Cu # 1/0 desnudo 7H</b>	Mtrs.	17	14,40	244.8
<b>Cable Cu # 2 desnudo de 7H</b>	Mts.	96	3.00	288
<b>bentonita</b>	u/c	80	18	1440
<b>Terminales de bronce pernos partidos cable 4/0</b>		90	14	1260
<b>Accesorios tipo(pernos. ,tuercas, terminales, pasta contacto, etc)</b>		20	10	200
<b>Transporte</b>			200	200
<b>Mano de obra</b>			960	960
<b>SUBTOTAL</b>				20387.20
<b>COSTO INDIRECTOS Y UTILIDADES</b>				3978.91
<b>COSTO TOTAL</b>				24366.11

## Presupuesto de la malla con soldadora exotérmica

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/ UN.	COSTO/ TOTAL
<b>Cable Cu desnudo 19 h. # 4/0 AWG</b>	Mts.	448	25.70	11,513.6
<b>Cable desnudo 19h. #2/0 AWG</b>	Mts.	120	15.79	1894.8
<b>Varilla puesta a tierra 5/8" de 2.40 mts</b>	u/c	18	18	324
<b>Molde de soldadura "T: cable 4/0 a 2/0</b>	u/c	2	125	250
<b>Molde de soldadura "T" cable 4/0 a 4/0</b>	u/c	2	150	300
<b>Molde de soldadora "X" cable 4/0 a 4/0</b>	u/c	2	150	300
<b>Carga de soldadura exotérmica (150, 200)</b>	gramos	100	14.4	1440
<b>Cable Cu # 1/0 desnudo 7H</b>	Mtrs.	17	14,40	244.8
<b>bentonita</b>	c/u	80	18	1440
<b>Cable Cu # 2 desnudo de 7H</b>	Mts.	96	3.00	288
<b>Terminales de bronce pernos partidos cable 4/0</b>		90	14	1260
<b>Accesorios tipo(pernos. ,tuercas, terminales, pasta contacto, etc)</b>		20	10	200
<b>Transporte</b>			200	200
<b>Mano de obra</b>			960	960
<b>SUBTOTAL</b>				20615.2
<b>COSTO INDIRECTOS Y UTILIDADES</b>				4026.19
<b>COSTO TOTAL</b>				24641.39

**ANEXO 6**



**ANEXO 7**

