



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Rehabilitación del sistema de puesta a tierra de
la subestación eléctrica Kilómetro Cero

Informe escrito que para obtener el título de:

Ingeniero Eléctrico Electrónico

PRESENTA

José Armando Garibay Méndez

Director de informe escrito:

Ing. Guillermo López Monroy



Ciudad Universitaria, Distrito Federal, 2013

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por haberme apoyado moral y económicamente durante toda mi vida, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

A mis hermanos por haberme socorrido todas esas veces que yo tenía dudas sobre lo que hacía y que supieron ayudarme a encontrar mi camino y mi vocación.

A mi próxima esposa Emma que me ha apoyado desde siempre y que ha aportado su valiosa ayuda para que yo concluyera esta meta.

A mi profesor asesor el Ing. Guillermo López Monroy que con su gran calidad, experiencia y conocimientos en el ámbito de la ingeniería, así como su constante supervisión me ayudó a concluir este trabajo.

A mis profesores sinodales los ingenieros: Roberto Espinoza, Cesar López, Alberto Mondragón y Alejandro Sosa por haber aceptado revisar y aprobar mi trabajo, sus valiosas observaciones fueron de mucha ayuda para la conclusión del mismo.

Al Ing. Miguel Ángel Cruz Silos quien a pesar de contar con muy poco tiempo libre se tomó la molestia de ser mi aval y me apoyó durante todo el tiempo dentro de la CFE para lograr esta meta.

A mis compañeros de carrera y de la CFE ya que siempre he contado con su total apoyo.

A todos mis amigos por estar conmigo durante todos estos años y entender a este ser humano a veces un poco complicado.

Finalmente quiero agradecer a Dios por permitirme dar este gran paso, por darme vida y salud para seguir trabajando por mi futuro y el de mi familia.

REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA KILÓMETRO CERO.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. ANTECEDENTES DEL TEMA	5
2.1 Propósito de un sistema de puesta a tierra	5
2.1.1. Condiciones peligrosas	5
2.2. Elementos básicos de un sistema de puesta a tierra	7
2.2.1. Conductores	7
2.2.2. Varillas o electrodos de tierra	7
2.3.3. Conectores	8
2.3. Resistividad del suelo y mediciones de campo.....	8
2.3.1. Resistividad del terreno	8
2.3.2. Medición de la resistividad por el método Wenner	10
2.3.3. Prueba de inyección de corriente eléctrica a equipos de la subestación.....	11
2.4 Corriente de corto circuito	13
2.4.1. Máxima corriente de la red de tierra	16
2.5 Cálculo de la sección transversal del conductor	17
2.6 Cálculo estimado de la resistencia a tierra	19
2.6.1. Cálculos simplificados	20
2.7 Efectos de la circulación de corriente eléctrica en el cuerpo humano	21
2.7.1. Cálculo de la corriente tolerable por el cuerpo humano	22
2.7.2. Resistencia del cuerpo humano	23
2.7.3. Circuitos accidentales equivalentes	23
2.7.4. Efecto de la capa de roca triturada en la superficie de la subestación	25
2.7.5. Potencial de paso tolerable	27
2.7.6. Potencial de contacto tolerable	27
2.8 Cálculo de potenciales de malla	28
2.8.1. Potencial de contacto	28
2.8.2. Potencial de paso	31
2.9 Longitud mínima del conductor de la red	32
2.10 Procedimiento esquematizado del diseño de la red de tierra.	33

3. CONTEXTO DEL PROBLEMA	37
4. ALCANCE	39
5. REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN	41
5.1 Excavación de zanjas	41
5.2 Sustitución de conexiones de compresión por conexiones de soldadura exotérmica ...	41
5.3 Relleno con material producto de la excavación	42
5.4 Puesta a tierra de estructuras y equipos eléctricos de la subestación	43
5.5 Puesta a tierra del cuarto de control	44
5.5.1. Puesta a tierra de equipo e instalación de supresor de transitorios TVSS	44
5.5.2. Anillo de tierra	44
5.6 Instalación de electrodos y registros de tierra	45
5.7 Actualización del plano de la subestación	46
5.8 Resumen	48
6. PARTICIPACIÓN PROFESIONAL	49
6.1. Simulación digital del sistema de puesta a tierra.....	49
6.1.1. Datos de diseño	49
6.1.2. Criterios de diseño	50
6.1.3. Resultados de la simulación.....	51
6.1.4. Hoja de calculo para condicion humeda	65
6.1.5. Hoja de calculo para condicion seca.....	67
7. CONCLUSIONES	69
8. BIBLIOGRAFÍA	70

1. INTRODUCCIÓN

Las Subestaciones eléctricas de potencia dentro del valle de México operan con valores nominales de tensión de 400, 230, 115, 85 y 23 KV. Estas pertenecen a la Comisión Federal de Electricidad, son de tipo abierta tradicional, a excepción de las subestaciones Azcapotzalco, Coyoacán y San Bernabé que cuentan con tableros Metal Clad[#] e interruptores con cámara de extinción en Hexafluoruro de azufre (SF6)^{*}.

En las subestaciones eléctricas, uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones, ya sean de origen interno o externo, es el de disponer de un adecuado sistema de puesta a tierra al cual se conectan los neutros de los equipos eléctricos y todas aquellas partes metálicas que deben estar al mismo potencial de tierra.

Durante la condición de falla a tierra, el flujo de la corriente a tierra producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de la subestación, con magnitudes suficientes para poner en peligro al personal dentro de la subestación, así mismo pueden generar diferencias de potencial peligrosas entre estructuras o carcasas de equipo que estén aterrizados y la referencia a tierra más próxima.

Los trabajos que realicé como trabajador del departamento de subestaciones consistieron en evaluar y supervisar la rehabilitación de las deficiencias identificadas de la red de tierra de la **subestación Kilómetro Cero perteneciente a la Gerencia Regional de Transmisión Central de la CFE.**

Con la realización de estos trabajos se obtuvo un incremento de la seguridad, confiabilidad y continuidad en la operación de las Subestaciones eléctricas de potencia.

[#]Conjunto de equipos formado por varias secciones metálicas blindadas, firmemente ensambladas, autosoportadas y con divisiones metálicas sólidamente aterrizadas, usualmente es utilizado en lugares donde se cuenta con poco espacio.

^{*} El hexafluoruro de azufre (SF6) es un gas con un mayor índice de dielectricidad que el aire, es incoloro y en condiciones normales de operación es utilizado como medio de extinción del arco eléctrico formado al interrumpir el flujo de energía eléctrica en un sistema eléctrico de potencia.

2. ANTECEDENTES DEL TEMA

2.1. Propósito de un sistema de puesta a tierra.

En términos generales el diseño de un buen sistema de puesta a tierra debe tener como objetivos principales las siguientes dos condiciones:

- a) Proveer los medios necesarios para enviar corrientes a tierra en condiciones de operación normal y en falla, sin sobrepasar los límites de operación de los equipos para asegurar la continuidad del servicio eléctrico.
- b) Asegurar que cualquier persona en la vecindad de la subestación no se encuentre fácilmente expuesta a un shock eléctrico crítico.

Sin duda el objetivo principal más importante será siempre contar con las bases y criterios necesarios en el diseño y así asegurar la protección del elemento máspreciado e invaluable en un circuito accidental que es la vida humana.

2.1.1. Condiciones peligrosas.

Durante fallas típicas a tierra, el flujo de corriente que circula por el sistema de puesta a tierra producirá gradientes de potencial dentro y fuera de la subestación, a menos que no se tomen las precauciones necesarias en el diseño. El gradiente de potencial máximo en la superficie del terreno de la subestación que se genera durante condiciones de falla, podría poner en peligro a una persona que se encuentre dentro del área en cuestión.

Las circunstancias que hacen posibles los accidentes por descargas eléctricas son las siguientes:

- a) Una corriente de falla relativamente alta en relación al área del sistema de puesta a tierra y su resistencia.

- b) La resistividad del terreno y la distribución de las corrientes a tierra de tal manera que se den altos gradientes de potencial en algunos puntos de la superficie del terreno.
- c) La presencia de un individuo en un punto, tiempo y posición de tal manera que el cuerpo pueda estar siendo usado como un puente entre dos puntos con una diferencia de potencial alta.
- d) La ausencia de la resistencia de contacto suficiente y otras resistencias en serie para limitar la corriente que circula por el cuerpo a un valor seguro.
- e) La duración de la falla y el contacto del cuerpo humano con la corriente, de tal manera que el flujo de corriente eléctrica dure lo suficiente para causar daños en el mismo.

La frecuencia de los accidentes tendrá mucho que ver con la probabilidad de coincidencia de las circunstancias enlistadas arriba.

2.2. Elementos básicos de un sistema de puesta a tierra.

2.2.1. Conductores.

Sirven para formar el sistema de puesta a tierra y para la conexión a tierra de los equipos. Los conductores empleados en los sistemas de tierra, generalmente son cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre, cobre estañado, copperweld¹, acero o acero inoxidable.

El cobre es el conductor más común, ya que tiene buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión y la fusión. El calibre de los conductores se determina por requerimientos de conducción de corriente en el cálculo del sistema de puesta a tierra.

2.2.2. Varillas o electrodos de tierra.

Estos elementos se insertan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo.

Los materiales empleados en la fabricación de varillas o electrodos de tierra son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld.

El copperweld es el material más empleado en las varillas de tierra ya que combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, así mismo, proporciona buena conductividad, resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica para ser introducida en el terreno.

El diámetro y longitud de las varillas o electrodos, se determinará por la resistencia mecánica y por las características de resistencia eléctrica que presenten al encontrarse dentro del terreno.

¹ Acero recubierto de cobre o revestido de cobre (del inglés: copper-clad steel o copper-covered steel)

2.2.3. Conectores.

Son los elementos que nos sirven para unir los conductores del sistema de puesta a tierra para conectar las varillas a los conductores y para la conexión de los equipos al sistema de puesta a tierras.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son generalmente de 2 tipos:

- a) Conectores a presión
- b) Conectores soldables

En este caso solo tomaremos en cuenta los conectores soldables que son aquellos que mediante una reacción química exotérmica se unen a los conductores, ya que estos se soldan en una conexión molecular.

Los conectores deberán seleccionarse con el mismo criterio con que se seleccionan los conductores y tendrán las siguientes propiedades:

- a) Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce al circular corrientes elevadas por él.
- b) Tener a los conductores lo suficientemente asegurados para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por las fallas, además de no permitir que el conductor se mueva dentro de él.

2.3. Resistividad del suelo y mediciones de campo.

2.3.1. Resistividad del terreno.

La resistividad eléctrica o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga un área con sección transversal y longitud unitarias.

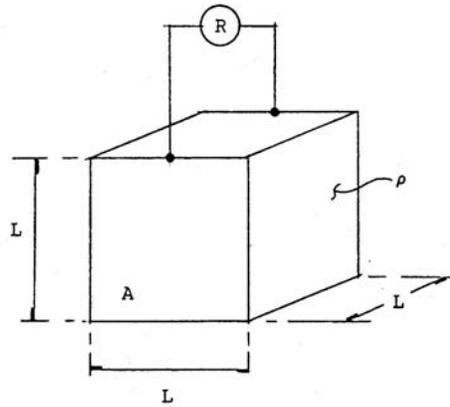


Fig. 1 Resistividad del terreno

De la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \dots(1)$$

Despejando a ρ :

$$\rho = R \frac{A}{L} = \text{Ohms} \frac{\text{long} \times \text{long}}{\text{long}} = \text{Ohms} \cdot \text{long} \quad \dots(2)$$

En el sistema métrico:

ρ = Resistividad del terreno en Ohms-metro.

R = Resistencia en Ohms.

A = Área de la sección transversal en m².

L = Longitud en m.

La resistividad del terreno para el diseño de una red de tierras, generalmente se determina por una interpretación apropiada de los datos de campo.

Debido a que la resistividad del terreno varía tanto horizontal como verticalmente, los datos se obtienen por pruebas en varios lugares de la subestación y a una cierta profundidad en el terreno, estos se conocen como "perfil de resistividad aparente del suelo".

La resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando su contenido de humedad es alto. La cantidad de agua en el suelo depende del tamaño de las partículas presentes y de su compactación, es decir, que el suelo será más resistivo mientras menos humedad exista y viceversa.

La composición y la cantidad de sales solubles, ácidos o álcalis presentes en el suelo, también pueden afectar considerablemente su resistividad.

La investigación en campo del lugar en que se va a ubicar una subestación es esencial para determinar la composición del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca de su estado.

2.3.2. Medición de la resistividad por el método Wenner

Este método es el más empleado para la medición de la resistividad promedio del terreno y consta de los siguientes pasos.

- 1.- Se entierran pequeños electrodos a una profundidad "B" y espaciados sobre una línea recta a intervalos "A".
- 2.- Se hace circular una corriente de prueba I entre los dos electrodos exteriores y se mide con un voltmetro de alta impedancia la tensión entre los electrodos interiores.

La relación V/I nos dará el valor de la resistencia R en Ohms.

Con este arreglo, los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la siguiente figura:

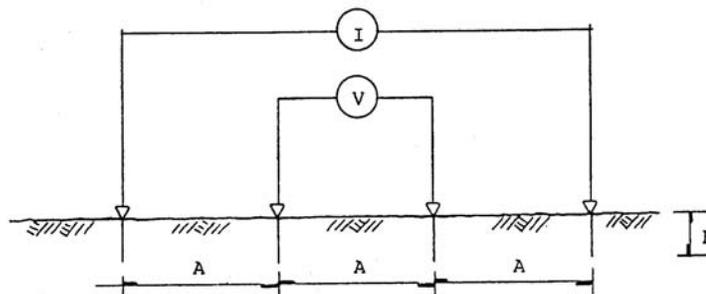


Fig. 2 Método Wenner

Si “A” es la distancia entre dos electrodos adyacentes, la resistividad, en términos de las unidades de longitud en que “A” y “B” se midan, será:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \dots\dots(3)$$

Si “A” y “B” se miden en cm., o en m., y la resistencia R en Ohms, la resistividad estará dada en Ohms.cm o en Ohms.m, respectivamente. Si la longitud “B” es mucho menor que la longitud “A”, puede suponerse B=0 la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR \dots\dots(4)$$

Con estas fórmulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente, las lecturas obtenidas en campo pueden indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

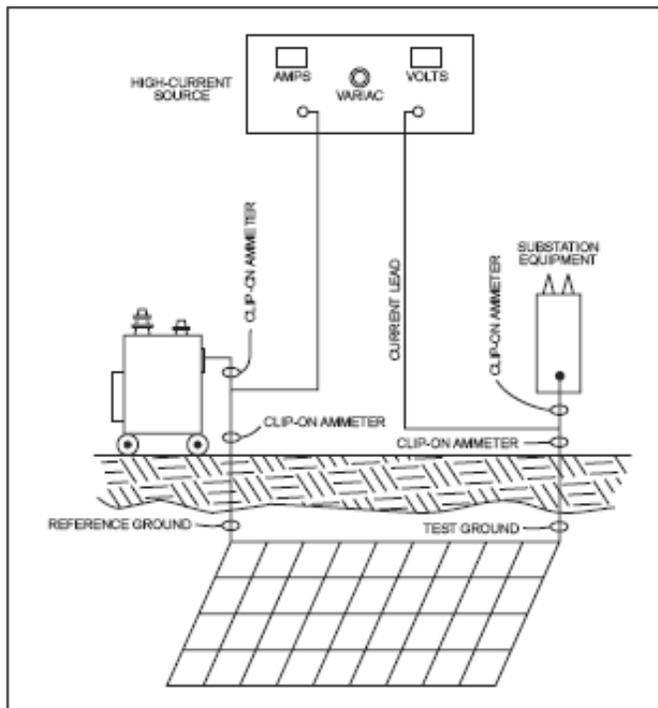


Fig. 3 Medición de resistividad del terreno

2.3.3. Prueba de Inyección de corriente eléctrica a equipos de la subestación.

Otra prueba que se realiza exclusivamente a los equipos instalados en la subestación, cuando ya existe un sistema de puesta a tierra, consiste en medir la corriente drenada a tierra en el sistema simulando una falla a tierra; es decir, mediante un equipo de inyección de corriente se inyectan máximo 300 A de corriente con un voltaje doméstico de 220 VCA en la puesta a tierra de los equipos, así mismo con la ayuda de 2 ampermetros se verifica la cantidad de corriente que se drena a tierra y la corriente que “regresa” al equipo, con esto se logra verificar que en efecto exista un camino de baja impedancia para la circulación de la

corriente de falla, verificando así el buen funcionamiento del sistema de puesta a tierra, a esta prueba también se le suele llamar prueba de integridad física de la malla del sistema de puesta a tierra.



Basic Connection Diagram

GTS-300
Safety Ground & Ground Grid Test Set

Fig. 4 Diagrama de conexiones básicas del equipo Megger® GTS-300 de inyección de corriente



Fig. 5 Equipo GTS-300 durante pruebas de campo



Fig. 6 Prueba de inyección de corriente

2.4. Corriente de corto circuito

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra se consideran las fallas de una fase a tierra y la de dos fases a tierra, de estos dos tipos de falla la de mayor ocurrencia y usualmente mayor magnitud de corriente es la de una fase a tierra, por lo que es el tipo de falla que normalmente se toma en cuenta para cálculo de la red de tierra.

La corriente de secuencia cero para una falla de fase a tierra está determinada por la siguiente ecuación:

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad \dots(5)$$

Donde:

I_0 = valor simétrico eficaz de la corriente de secuencia cero (A)

E = tensión de fase a neutro en el punto de falla (V)

R_f = resistencia de falla estimada (Ω)

R_1 = resistencia de secuencia positiva equivalente del sistema (Ω)

R_2 = resistencia de secuencia negativa equivalente del sistema (Ω)

R_0 = resistencia de secuencia cero equivalente del sistema (Ω)

X_1 = reactancia de secuencia positiva equivalente del sistema (Ω)

X_2 = reactancia de secuencia negativa equivalente del sistema (Ω)

X_0 = reactancia de secuencia cero equivalente del sistema (Ω)

En el cálculo de I_0 normalmente se considera la condición más desfavorable, es decir que no exista una impedancia a tierra para limitar la corriente de falla por lo que:

$$R_f = 0 \quad \dots(6)$$

La magnitud de la corriente simétrica eficaz para una falla de fase a tierra está definida por la siguiente expresión:

$$I_f = 3I_0 \quad \dots(7)$$

En los estudios de cortocircuito los valores que se obtienen son las magnitudes de la corriente simétrica eficaz, pero en el diseño de un sistema de puesta a tierra se debe

considerar la corriente asimétrica, por lo que requiere tomarse en cuenta el factor de decremento para ser incluido en el valor de corriente de falla con el efecto del desplazamiento de la componente de corriente directa.

En general, la corriente de falla asimétrica incluye las componentes de corriente alterna subtransitoria, transitoria, estado estable y la componente de corriente directa de desplazamiento.

La corriente asimétrica de falla como una función periódica del tiempo puede ser expresada de la siguiente forma:

$$i_f(t) = \sqrt{2}VY_{eq} \left[\text{sen}(\omega t + \phi - \theta) - e^{-t/T_a} \text{sen}(\phi - \theta) \right]$$

$$T_a = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R}$$

$$\omega = 2\pi f \quad \dots(8)$$

Donde:

- $i_f(t)$ = corriente de falla asimétrica (A) en función del tiempo (s)
- V = tensión eficaz de prefalla, de línea a neutro (V)
- f = frecuencia del sistema
- ϕ = ángulo de la tensión en la iniciación de la corriente de falla ó ángulo de fase en el momento de la falla (radianes)
- θ = ángulo de fase del circuito (radianes)
- Y_{eq} = admitancia equivalente del sistema (mhos)
- T_a = constante de tiempo de la componente de c.d. de desplazamiento. (s)
- ω = frecuencia angular (radianes)
- L = inductancia que determina la reactancia X equivalente en el punto de la falla, a la frecuencia del sistema (henrys)

Para obtener la condición más severa de falla, es necesario considerar, en el diseño del sistema de puesta a tierra, que la máxima magnitud de la componente de corriente directa está presente en el momento de ocurrir el contacto accidental y que la componente de corriente alterna no decrece con el tiempo permaneciendo en su valor inicial.

Como el umbral de fibrilación está basado en una corriente senoidal simétrica de amplitud constante, es necesario determinar un valor eficaz (rms) equivalente de la onda de corriente asimétrica de corto circuito, para el tiempo máximo de liberación de la falla.

El valor eficaz de la onda de corriente asimétrica en el intervalo de tiempo de duración de la falla puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$I_F = D_f I_f \dots(9)$$

Donde:

- I_F = corriente de falla asimétrica eficaz (A)
- I_f = corriente de falla simétrica eficaz (A)
- D_f = factor de decremento
- t_f = tiempo de liberación de la falla (s)

El factor de decremento es:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \dots(10)$$

El factor de decremento que se obtiene con la ecuación anterior es para un tiempo de duración de la falla y para una relación X/R específicos en donde:

$$X = X_1 + X_2 + X_0$$

$$R = R_1 + R_2 + R_0 \dots(11)$$

X_i y la R_i son las componentes de la impedancia subtransitoria equivalente en el punto de localización de la falla.

2.4.1. Máxima corriente de la red de tierra

La máxima corriente de falla que pueda circular entre una red del sistema de puesta a tierra y el terreno que la rodea, queda determinada por la corriente de falla asimétrica eficaz calculada, es decir:

$$I_G = I_F \dots\dots(12)$$

Donde:

I_G = Corriente de la red de tierra (A)

I_F = Corriente de falla asimétrica eficaz (A)

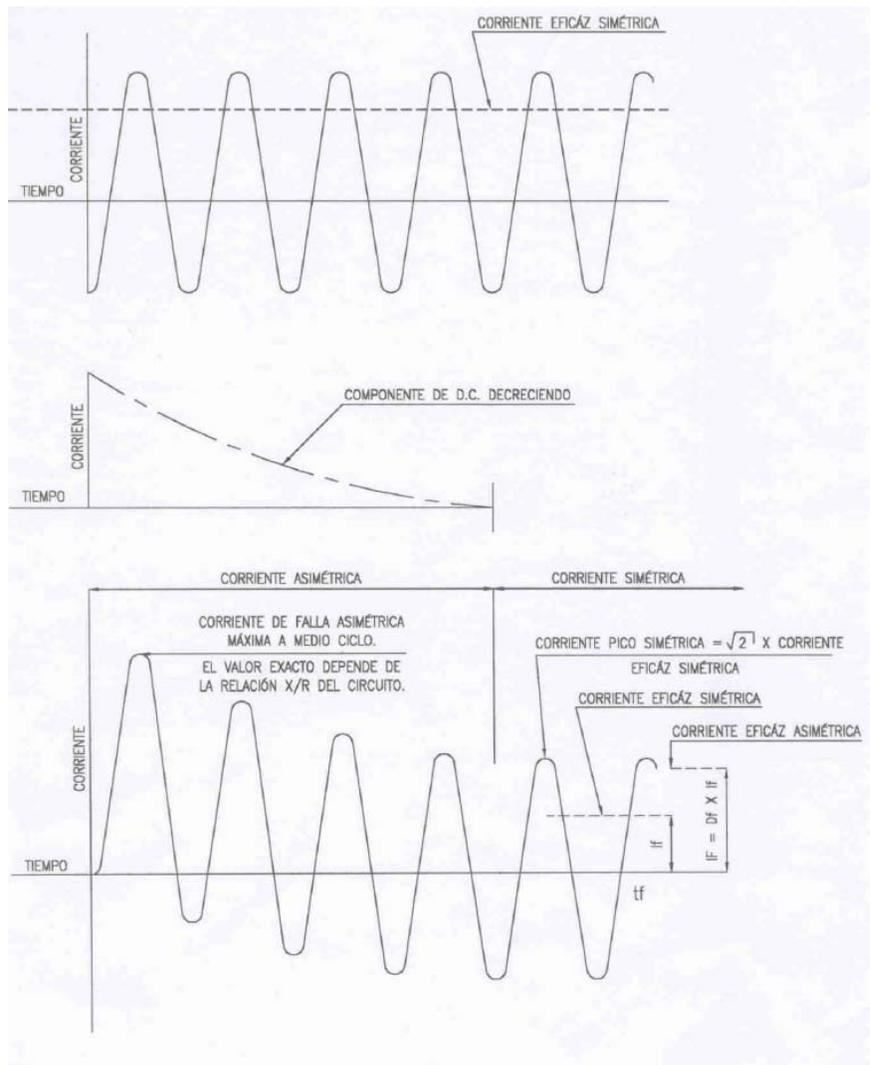


Fig. 7 Relación entre valores reales de corriente y los valores de I_F , I_r y D_f para un tiempo de falla t_f

2.5 Cálculo de la sección transversal del conductor

Los conductores empleados en el sistema de puesta a tierra deben ser capaces de soportar la máxima corriente de falla durante un tiempo determinado sin llegar a la fusión², la ecuación que evalúa la ampacidad de cualquier conductor del cual se conocen las constantes de su material es:

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \dots (13)$$

Donde:

- I = Corriente rms en Kiloamperes
- A = Sección transversal del conductor en mm²
- T_m = Temperatura máxima permisible en °C
- T_a = Temperatura ambiente en °C
- T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C
- α₀ = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C
- α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r
- ρ_r = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia T_r en μΩ-cm
- K₀ = 1/α₀ , ó (1/α_r)-T_r
- t_c = Tiempo de duración del flujo de corriente en segundos
- T_{CAP} = Factor de capacidad térmica en J / cm³ / °C

Si el tamaño del conductor está dado en circular mils, la ecuación se convierte a:

$$I = 5.0671 \cdot 10^{-6} A \sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \dots (14)$$

² Proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia del estado sólido al estado líquido por la acción del calor.

Se muestran las constantes del material en la tabla 1.

Descripción	Conductividad del Material (%)	α_r Factor @ 20°C	K_0 ($1/\alpha_0$) @ 0°C	Temperatura de fusión (°C)	ρ_r @ 20°C ($\mu\Omega\text{-cm}$)	Valor efectivo del factor TCAP ($\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$)
Alambre de cobre suave recocido estándar	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Alambre de cobre duro recocido comercial	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Alambre de núcleo de acero revestido con cobre	40.0	0.00378	245	1084/1300	4.397	3.846
Alambre de núcleo de acero revestido con cobre	30.0	0.00378	245	1084/1300	5.862	3.846
Alambre de aluminio EC comercial	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Alambre 5005 de aleación de Aluminio	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Alambre 6021 de aleación de Aluminio	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Alambre de núcleo de acero con recubrimiento de aluminio	20.3	0.00360	258	660/1300	8.4805	2.670
Alambre de núcleo de acero con recubrimiento de zinc	8.5	0.00320	293	419/1300	20.1	3.931
Acero inoxidable No. 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Tabla No.1 Constantes de materiales³

Existe una simplificación utilizando unidades inglesas:

$$A_{kcmil} = (I)(K_f)(\sqrt{tc}) \dots(15)$$

Donde:

A_{kcmil} es el área del conductor en kcmil

I es el valor rms de la corriente de falla en KA

tc es la duración de la falla

K_f es una constante utilizada de la tabla

³ Referencia: IEEE std 80-2000 Guide for safety in AC substation grounding pag. 42

Material	Conductivity (%)	T_m^a (°C)	K_f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Tabla No. 2 Constantes de material a diferentes T_m y a una temperatura ambiente de 40° C⁺

2.6 Cálculo estimado de la resistencia a tierra

Un sistema de puesta a tierra deberá proveer una resistencia a tierra con valores cercanos a cero, en la práctica la elevación del potencial a tierra en el lugar de la subestación, se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla; a altas corrientes se deberá tener un valor muy bajo de resistencia a tierra del sistema.

Para subestaciones de potencia es recomendable tener valores de resistencia a tierra cercanos a 1 Ohm o menos, mientras que en subestaciones de distribución un rango aceptable es de 1 a 5 Ohms, dependiendo de las condiciones locales.

2.6.1. Cálculos simplificados

El valor estimado de la resistencia a tierra es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el arreglo básico del sistema de puesta a tierra, a primera vista esto podrá parecer difícil; el sistema de puesta a tierras todavía no está diseñado y su resistencia es desconocida.

Afortunadamente, la resistencia depende en primer lugar del área ocupada por el sistema de puesta a tierras, la cual es conocida desde que se inicia el diseño.

Como primera aproximación, el valor mínimo de la resistencia a tierra en la subestación en suelo uniforme puede estimarse por medio de la fórmula de una placa metálica circular una vez que se ha determinado la resistividad del suelo.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad \dots (16)$$

Donde:

R_g = Resistencia a tierra en Ohms

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ohm-metro

A = Área ocupada por la malla de tierra en m^2

Puede obtenerse un valor límite de la resistencia agregando un término a la fórmula anterior:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L}} \quad \dots (17)$$

Donde L es la longitud total de conductores enterrados de la red en m.

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema que consiste en un número determinado conductores, es mucho mayor que el formado por una placa sólida y que esta diferencia decrecerá cuando se incremente la longitud de los

conductores enterrados, aproximándose a cero cuando L sea infinita, alcanzándose la condición de una placa sólida.

Las ecuaciones anteriores pueden emplearse para profundidades de la malla menores a 0.25 metros con una precisión aceptable, sin embargo para profundidades más grandes se toma en cuenta la ecuación:

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

Donde: h es la profundidad de la malla

2.7 Efectos de la circulación de corriente eléctrica en el cuerpo humano.

Los efectos de la corriente eléctrica al pasar por las partes vitales del cuerpo humano dependen de la magnitud, duración y frecuencia de la corriente, la consecuencia más peligrosa es una condición en el corazón conocida como fibrilación ventricular, la cual resulta en la gran mayoría de los casos en un paro cardíaco.

En la siguiente tabla, se muestran los efectos causados por la circulación de distintas magnitudes de corriente eléctrica en el cuerpo humano:

Corriente (mA)	Efectos de la corriente en el cuerpo humano
Menor a 1 mA	Sin sensación
De 1 a 8 mA	Umbral de percepción, sin dolor.
De 8 a 15 mA	Dolor, pérdida de control muscular
De 15 a 20 mA	Dolor, pérdida de control muscular, no puede caminar
De 20 a 50 mA	Dolor, contracción muscular, dificultad para respirar
De 50 a 100 mA	Posible fibrilación ventricular.
De 100 a 200 mA	Fibrilación, muerte sin desfibrilación.
Mayor de 200 mA	Quemadura de primer grado, contracción muscular severa

Tabla No.3 Efectos de la corriente en el cuerpo humano

En el diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación, la magnitud de corriente que puede circular por el cuerpo de una persona, se debe mantener por debajo del umbral de fibrilación para evitar algún daño o la muerte.

2.7.1. Cálculo de la corriente tolerable por el cuerpo humano

La magnitud de corriente de no fibrilación con un rango de duración de 0.03 a 3.0 segundos, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y está determinada por la siguiente ecuación:

$$S_B = I_B^2 t_f \dots(18)$$

Donde:

I_B = magnitud eficaz (rms) de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_f = duración de exposición de la corriente (s)

S_B = constante obtenida empíricamente, relacionada con la energía de choque eléctricos soportada por un porcentaje determinado de personas.

El tiempo de duración de la corriente a frecuencia de 60 Hz, que la mayoría de la gente puede soportar sin fibrilación ventricular, está relacionado con la magnitud de la corriente de acuerdo a la ecuación anterior, obteniéndose:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_f}} \dots(19)$$

Donde:

$$k = \sqrt{S_B} \dots(20)$$

La constante S_B que está relacionada con la energía de choque que pueden soportar las personas con un peso aproximado de 50 kg, tiene un valor de:

$$S_B = 0.0135 \dots(21)$$

Con lo que la corriente tolerable por una persona de 50 kg que es el caso más crítico en el cálculo es:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \dots(22)$$

2.7.2. Resistencia del cuerpo humano

Para la corriente directa y la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia, esta resistencia está medida entre extremidades, las cuales son, entre una mano y ambos pies o entre un pie y otro, en cualquiera de los dos casos, el valor de esta resistencia es difícil de establecer.

Un valor de resistencia para el cuerpo humano es aproximadamente de 300 Ohms, aunque se ha determinado por estudios empíricos un rango entre 500 y 300 Ohms.

Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1 KV y 5 A respectivamente), la resistencia disminuye por daño o perforación de la piel en el punto de contacto.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- b) Se ha seleccionado el valor de 1000 Ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro.

$$R_B = 1000 \Omega \dots(23)$$

2.7.3. Circuitos accidentales equivalentes

La figura 8 define el circuito equivalente de un contacto pie a pie, el potencial U es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos sobre la superficie del terreno, separados por la distancia de un paso.

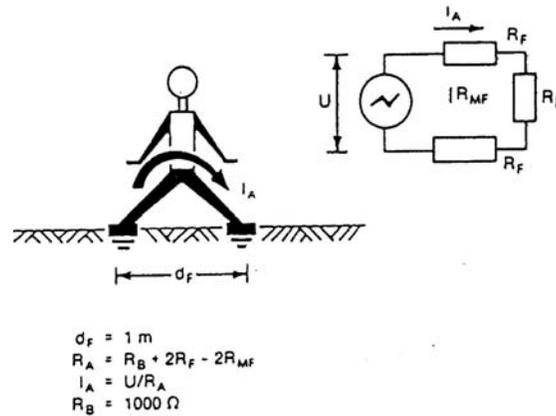


Fig. 8 Impedancia equivalente contacto pie a pie

La resistencia equivalente para el circuito del potencial de paso es:

$$R_A = R_B + 2 R_{foot} - 2R_{Mfoot} \dots\dots(24)$$

El circuito equivalente para el contacto entre una mano y los pies se muestra en la figura 8

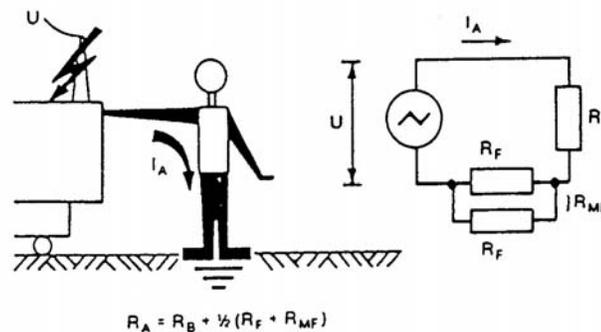


Fig. 9 Impedancia equivalente contacto mano-pies

La resistencia equivalente para el circuito del potencial de contacto está dada por:

$$R_A = R_B + \frac{1}{2} (R_{foot} + R_{Mfoot}) \dots\dots(25)$$

Para el propósito de análisis del circuito, el pie humano generalmente se representa como un disco metálico conductor despreciando la resistencia de contacto de los zapatos.

La resistencia a tierra en Ohms de un disco metálico de radio b en metros sobre la superficie de un suelo homogéneo de resistividad ρ ($\Omega \cdot m$), está dado por:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \dots(26)$$

Para los cálculos se ha seleccionado un radio de 0.08 m (3 pulgadas) para el disco que representaría a un pie, despreciando el término correspondiente a la resistencia mutua.

Con esta aproximación, las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelo de los 2 pies se obtienen en forma numérica y expresadas en términos de ρ como:

$$R_{2Fs} = 6 (\rho) \dots(27)$$

$$R_{2Fp} = 1\frac{1}{2} (\rho) \dots(28)$$

2.7.4. Efecto de la capa de roca triturada en la superficie de la subestación

Las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelo de los 2 pies puede expresarse en forma análoga a las ecuaciones usadas para un suelo uniforme:

$$R_{2Fs} = 6.0 C_s (h_s K) \rho_s \dots(29)$$

$$R_{2Fp} = 1.5 C_s (h_s K) \rho_s \dots(30)$$

Donde:

C_s = Factor de reducción del valor nominal de la resistividad superficial

Factor de reflexión K;

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \dots(31)$$

Donde:

ρ_s = Resistividad de la roca triturada en Ohms-metro

ρ = Resistividad del terreno en Ohms-metro

h_s = Espesor de la capa de roca triturada, en metros

El valor de C_s puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$C_s = 1 - C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \dots (32)$$

La ecuación anterior y los valores obtenidos empíricamente están en un rango del 5% de error uno con respecto al otro.

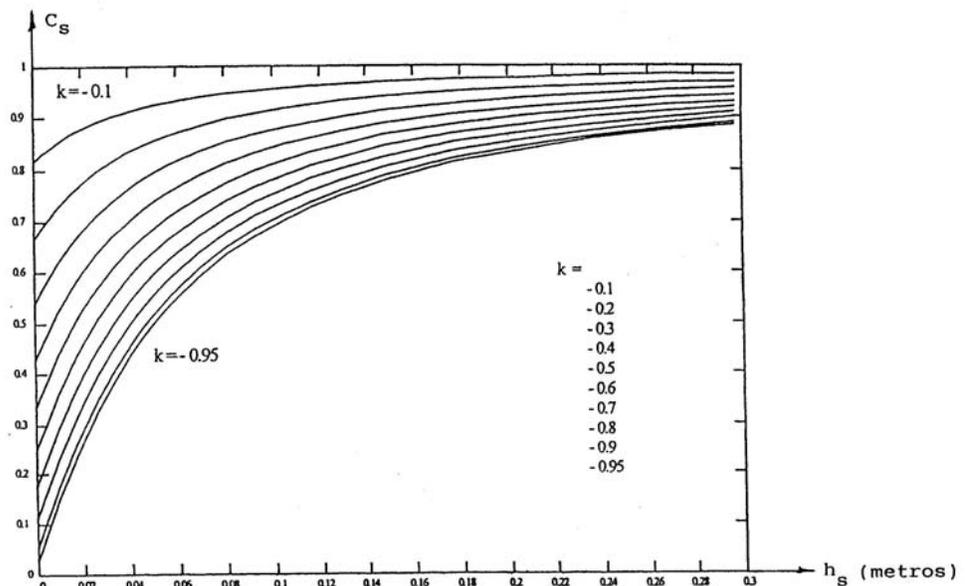


Fig. 10 Grafica para el cálculo de C_s

No.	Descripción de la Superficie del Material	Resistividad de la Muestra (ohm-metros)	
		Seco	Mojado
1	Granito triturado refinado	140×10^6	1,300
2	#57 Granito lavado similar a $\frac{3}{4}$ in.grava	190×10^6	8,000
3	Piedra caliza limpia ligeramente más gruesa al número 2	7×10^6	2,000 - 3,000
4	Granito lavado similar a $\frac{3}{4}$ in.grava	2×10^6	10,000
5	Granito lavado similar a grava Pca	40×10^3	5,000
6	Granito con agregado de base molida (refinada)	---	500-1,000
7	Concreto	2,000 - 10,000	50-100

8	Concreto	1,200 - 280,000	21-63
9	Asfalto	---	10,000
10	Asfalto	2x10 ⁶ - 30x10 ⁶	10,000 hasta 6x10 ⁶

Tabla No. 4 Resistividad típica de materiales empleados como material de superficie en subestaciones

2.7.5 Potencial de paso tolerable

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiados en el capítulo 2.7.3. y de la Fig. 8 en donde:

$$E_{\text{paso}} = (R_B + R_{2Fs})I_B \dots\dots(33)$$

$$E_{\text{paso50}} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots(34)$$

$$E_{\text{paso70}} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots(35)$$

2.7.6 Potencial de contacto tolerable

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiados en el capítulo 2.7.3. y de la Fig. 9 en donde:

$$E_{\text{cont}} = (R_B + R_{2Fp})I_B \dots\dots(36)$$

$$E_{\text{cont50}} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots(37)$$

$$E_{\text{cont70}} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots(38)$$

Donde:

$C_s = 1$ Para cuando no existe una capa superficial en la subestación

ρ_s = Resistividad del material de la superficie en Ohms-metro.

t_s = Duración de la corriente es segundos.

2.8. Cálculo de potenciales de malla

2.8.1. Potencial de contacto

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \dots(39)$$

Es el producto del factor geométrico K_m , el factor de irregularidad K_i , la resistividad del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I_G/L_s .

Cálculo del factor K_m :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{H_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \dots(40)$$

Donde:

$K_{ii} = 1$ Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro o con varillas en las esquinas de la malla o con varillas a lo largo del perímetro y por toda la malla.

$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$ Para mallas sin varillas de tierra o mallas que contengan sólo algunas varillas, ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro.

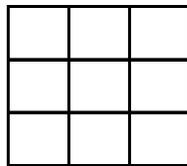
$$K_h = \sqrt{1+h/h_0} \dots(41)$$

h = Profundidad de la malla en metros.

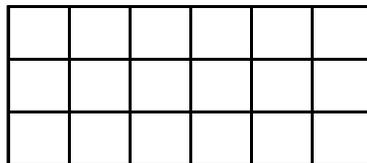
h₀ = 1 metro (Profundidad de referencia de la malla).

De acuerdo con el arreglo de la subestación, pueden presentarse las siguientes formas de malla:

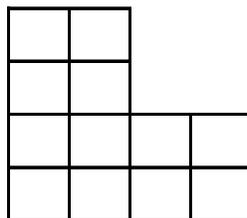
a) Cuadrada



b) Rectangular



c) En forma de L



El número efectivo de conductores paralelos n, en una malla dada, puede aplicarse a formas de malla rectangular o de forma irregular y representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \dots(42)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \dots(43)$$

$n_b = 1$ para mallas cuadradas

$n_c = 1$ para mallas cuadradas o rectangulares

$n_d = 1$ para mallas cuadradas, rectangulares o en forma de L

Para cualquier otro caso:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \dots(44)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]_{L_x \cdot L_y}^{0.7 \cdot A} \dots(45)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \dots(46)$$

L_c = Longitud total de conductores en la malla horizontal en metros

L_p = Longitud de conductores en la periferia de la malla en metros

A = Área de la malla en metros cuadrados

L_x = Longitud máxima de la malla en la dirección x, en metros

L_y = Longitud máxima de la malla en la dirección y, en metros

D_m = Distancia máxima entre 2 puntos cualesquiera de la malla en metros

Cálculo del factor K_i :

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \dots(47)$$

Cálculo de la longitud L_M :

- a) Para mallas sin varillas de tierra, o mallas con algunas varillas distribuidas por toda la malla pero ninguna localizada en las esquinas o a lo largo del perímetro de la malla, la longitud efectiva de conductores enterrados es:

$$L_M = L_C + L_R \dots(48)$$

Donde L_R = Longitud total de las varillas, en metros

- b) Para mallas con varillas de tierra en las esquinas, así como a lo largo del perímetro y distribuidas en la malla, la longitud efectiva de conductores enterrados es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \dots(49)$$

Donde:

L_R = Longitud de cada varilla de tierra, en metros

2.8.2. Potencial de paso

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \dots(51)$$

Es el producto del factor geométrico K_s , el factor de corrección K_i , la resistividad del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I_G/L_s .

Para mallas con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva de conductores enterrados es:

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \dots(52)$$

Cálculo del factor K_s :

El máximo voltaje de paso, se supone ocurre sobre una distancia de 1 metro, fuera del conductor perimetral y extendiéndose sobre la bisectriz del ángulo que forma la esquina de la malla.

Para una profundidad de malla $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \dots (53)$$

2.9. Longitud mínima del conductor de la red

Debido a que la tensión máxima de malla debe ser menor a la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano, es necesario determinar la longitud mínima de los conductores sin considerar varillas de tierra.

Por lo tanto, para una persona con peso promedio de 50 kg, tendremos:

$$\frac{\rho K_m K_i I_G}{L_c} < (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}$$

$$L_c > \frac{\rho K_m K_i I_G \sqrt{t_f}}{(116 + 0.174 C_s \rho_s)}$$

Es necesario proponer inicialmente una distribución de conductores longitudinales y transversales para obtener una longitud inicial de conductor de la red $L_{c \text{ inicial}}$ y poder determinar el factor de espaciamiento para la tensión malla K_m .

2.10. Procedimiento esquematizado del diseño de la red de tierra.

A continuación se indica el método para el diseño de un sistema de puesta a tierra, estableciendo límites seguros para las diferencias de tensión que puedan presentarse en una subestación, bajo condiciones de falla de corto circuito, entre dos puntos en los que pueda tener contacto una persona.

Los pasos siguientes muestran una serie de recomendaciones y datos con los que el proyectista debe contar y otros que debe obtener al llevar a cabo el procedimiento.

Paso 1. Datos de campo

- Área ocupada por la malla de tierras y resistividad del terreno.
- El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general de arreglo de equipos de la subestación.
- En este plano estarán indicados los límites y la ubicación de los equipos.
- La resistividad del terreno podrá determinarse con el método Wenner estudiado en el tema 3.3.2 o de datos promedio proporcionados por tablas.
- Las pruebas de resistividad determinarán el perfil de resistividad y el modelo del suelo a utilizar.

Paso 2. Dimensionamiento del conductor

- Cálculo de la corriente de falla (tema 2.4.1).
- Tiempo de duración de la falla y diámetro del conductor de la malla.
- La corriente de falla podrá calcularse con las fórmulas descritas anteriormente y será la máxima que los conductores puedan conducir en la malla de tierras.
- El tiempo de duración de la falla reflejará el tiempo máximo posible para la liberación de la falla, incluido el de operación de una protección de respaldo.

Paso 3. Cálculo de potenciales de paso y de contacto tolerables.

- Los potenciales de paso y contacto tolerables, se calcularán con las ecuaciones 34 y 37 descritas anteriormente.

- La selección del tiempo t_s estará basado en el criterio de un ingeniero de diseño, de acuerdo con lo establecido en el estudio de coordinación de protecciones.

Paso 4. Diseño inicial de la malla

- El diseño preliminar de la malla deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación.

- Se localizarán conductores cruzados en dos direcciones formando una retícula para permitir la conexión a tierra de los diferentes equipos.

- El espaciamiento entre estos conductores y la localización de varillas de tierra, deberá basarse en la corriente I_G y en el área a proteger por la malla.

Paso 5. Resistencia a tierra de la malla

- Puede determinarse un valor preliminar de resistencia de la malla con las ecuaciones indicadas en el tema 2.6.1

- Para el diseño final, pueden encontrarse estimaciones más precisas de la resistencia, especialmente cuando en los cálculos se emplea la resistencia de las varillas.

- Para esta aplicación se utilizarán las ecuaciones que incluyen el efecto que produce el tener dos diferentes resistividades en el terreno.

Paso 6. Corriente de malla

- La corriente I_G se determina por las ecuaciones estudiadas anteriormente. Para evitar un sobredimensionamiento de la malla, se usará en el diseño, únicamente aquella parte de la corriente total de falla $3I_0$ que fluye de la malla hacia el terreno y que contribuye a los potenciales de paso y de malla y a la elevación de potencial de la malla.

- La corriente I_G deberá reflejar la peor condición de falla (tipo y localización), el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema eléctrico.

Paso 7. Comparación de potenciales

- Si la máxima elevación de potencial de la malla del diseño preliminar está por debajo del valor del potencial de contacto tolerable, ya no es necesario realizar más cálculos,

únicamente se agregarán, si se requieren, conductores adicionales para puesta a tierra de equipos.

Paso 8. *Cálculo de potenciales de paso y de contacto en la malla*

- Los potenciales de paso y de contacto en la malla se calcularán con las ecuaciones 39 y 51 descritas con anterioridad en el tema 2.8.

Paso 9. *Comparación de potencial de contacto en la malla con el potencial de contacto tolerable*

- En este paso se compararán el potencial de contacto en la malla, también llamado potencial de malla, con el potencial de contacto tolerable calculado en el paso 3. Si el potencial de malla es menor que el potencial de contacto tolerable, el diseño puede completarse (ver paso 10) y si no, tendrá que modificarse el diseño preliminar (ver paso 11).

Paso 10. *Comparación de potencial de paso en la malla con el potencial de paso tolerable*

- Si los potenciales de paso y de contacto en la malla son menores a los potenciales tolerables, el diseño necesitará solamente de conductores adicionales para puesta a tierra de equipos, si no, tendrá que revisarse el diseño preliminar.

Paso 11. *Revisión del diseño si se exceden los límites de los potenciales tolerables.*

- Se requerirá de una revisión en el diseño de la malla.
- Esta revisión incluirá espaciamientos más pequeños entre conductores, varillas de tierra adicionales, etc.

Paso 12. *Detalles en el diseño*

- Después de satisfacer los requerimientos para cumplir con los potenciales tolerables, deberá revisarse el diseño final para incluir conductores que hagan falta cerca de los equipos que se van a conectar a tierra, o adicionar varillas en las bases de los apartarrayos o en los neutros de transformadores, etc.

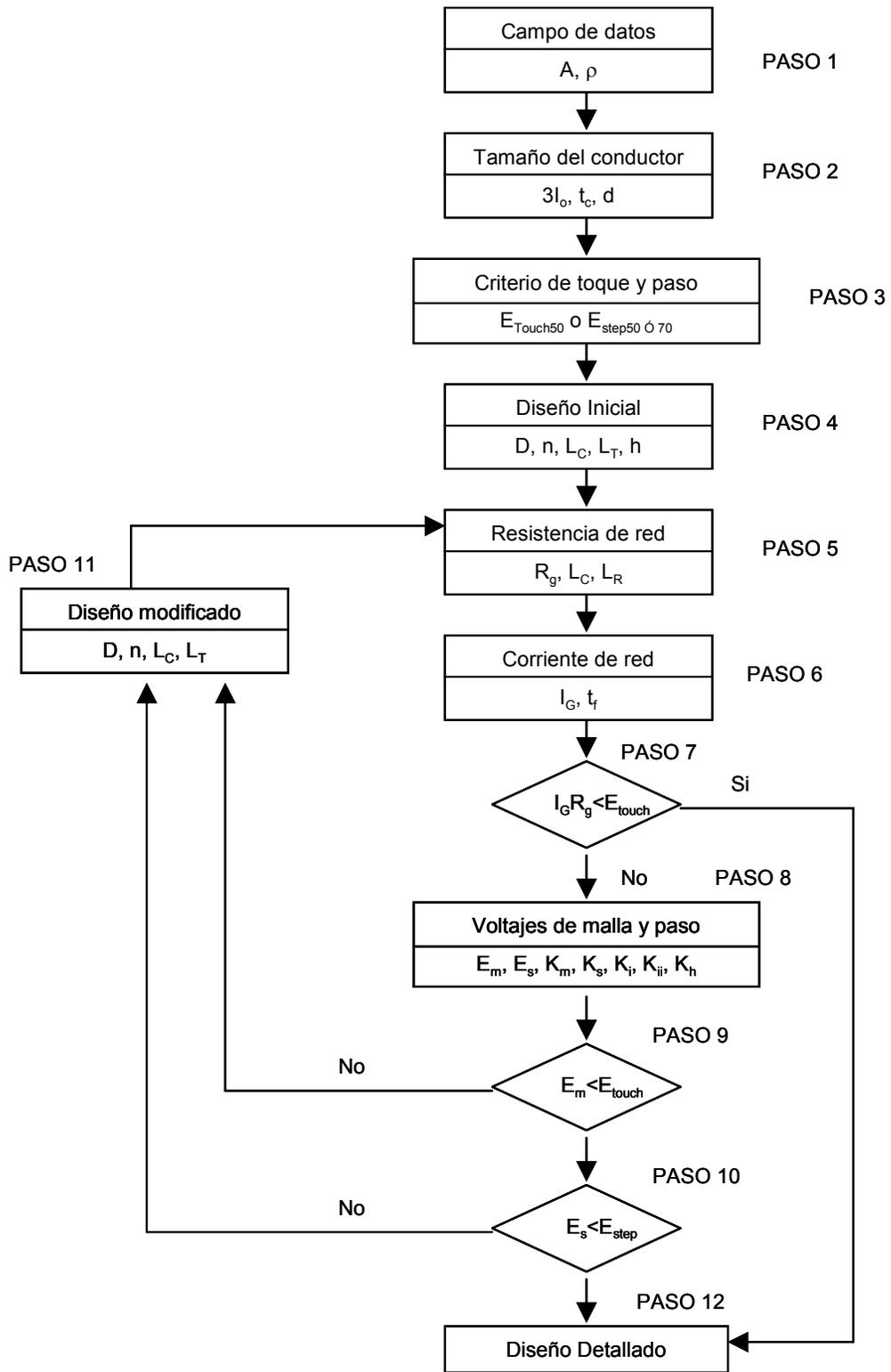


Fig. 11 Diagrama de flujo del procedimiento del diseño de la red de tierra

3. CONTEXTO DEL PROBLEMA.

Después del decreto de extinción de Luz Y Fuerza del Centro en el área centro de la República Mexicana, la Comisión Federal de Electricidad mediante la Gerencia Regional de Transmisión Central (GRTC) toma el control de todas las instalaciones de transmisión ubicadas en la zona metropolitana del Distrito Federal, así como de los estados de México, Hidalgo y Morelos, teniendo como responsabilidad satisfacer las demandas de consumo de energía eléctrica en el centro del país la GRTC inicia un proceso de modernización en todas las instalaciones de la zona, incluyendo las subestaciones eléctricas ahora pertenecientes a la CFE.

En su necesidad de asegurar un correcto funcionamiento de las subestaciones de transmisión y contar con la máxima confiabilidad en el funcionamiento de los equipos dentro de cada subestación, la GRTC otorga un contrato inicial a la oficina de Geoelectrica de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) por un “Servicio de medición, evaluación y diagnóstico al sistema de puesta a tierra física de las subestaciones Valle de México, Cerro Gordo, Kilometro Cero, Santa Cruz, Remedios y Donato Guerra”, dicho contrato consistió en presentar una propuesta técnica con acciones necesarias para mejorar la confiabilidad, seguridad y estabilidad de la subestación, se realizaron los siguientes trabajos:

- Levantamiento arquitectónico del sitio considerando límites perimetrales y distancias entre equipos primarios y construcciones (caseta de control y comunicaciones).
- Medición de la resistividad del terreno mediante el método del sondeo eléctrico vertical, con el arreglo entre electrodos Wenner que permite investigar algunas propiedades físicas del subsuelo a partir de las mediciones de una diferencia de potencial, cuando se inyecta corriente directa a través del medio, en este caso el suelo.
- Determinación de la topología del sistema mediante el zanjeo y exploración de terreno para determinar la profundidad y las condiciones actuales de la malla de tierra física de la subestación, así como la medición de continuidad con la finalidad de determinar

la trayectoria de la malla de tierra y comprobar la integridad de los conductores de la misma.

- Medición de la resistencia de contacto de la puesta a tierra de los equipos eléctricos y estructuras mediante el método de ganchos de inducción.
- Determinación de la integridad física de la malla la cual consiste en la inyección gradual de corriente alterna a los conductores de puesta a tierra de los equipos eléctricos verificando si cumplen con su cometido de drenar la corriente hacia la malla de tierra de manera eficiente.
- Proveer una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran.
- Simulación Digital de la red de tierra existente.



Fig. 12 Levantamiento arquitectónico



Fig. 13 Medición de resistividad



Fig. 14 Integridad física de la malla.

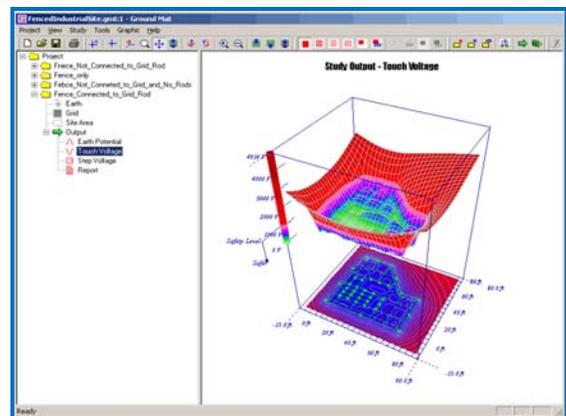


Fig. 15 Simulación digital de la red de tierra existente.

Derivado de los trabajos realizados en el proyecto la GRTC solicita nuevamente a la oficina de Geoeléctrica el apoyo para realizar un nuevo proyecto que contempla trabajos de evaluación y rehabilitación al sistema de puesta a tierra física en 20 subestaciones de la zona metropolitana, la GRTC otorga un nuevo contrato a la GEIC el cual lleva el nombre de “Servicio de evaluación, diagnóstico y mantenimiento al sistema de puesta a tierra física de las subestaciones eléctricas Taxqueña, Azcapotzalco, Madero, Ecatepec, Cerro Gordo, Valle de México, Azteca, San Bernabé, Chapingo, La Paz, Lechería, Magdalena, Nonoalco, Remedios, Teotihuacán, Victoria, Esmeralda, Santa Cruz, Kilometro Cero y Aurora”.

4. ALCANCE

Este proyecto contempla los alcances siguientes:

Para las subestaciones en proyecto donde aún no se han realizado estudios de evaluación y diagnóstico:

- Levantamiento eléctrico y de datos técnicos.
- Medición de resistencia de contacto de los sistemas de tierra física, estudio de la resistividad del terreno, evaluación de los potenciales de toque y de paso dentro de la subestación y pruebas de integridad de la malla de tierra.
- Inspección del cable utilizado en el sistema de puesta a tierra para determinar sus condiciones de operación.
- Elaboración o actualización de planos eléctricos del sistema de puesta a tierra de la subestación de acuerdo a sus condiciones actuales.
- Evaluación del sistema de puesta a tierra.

Para todas las subestaciones:

- Excavación en zanjas por medios manuales hasta una profundidad de 0.50 m para tendido de cable del sistema de puesta a tierra y en donde se requiera demolición de concreto por medios manuales.

- Retiro de conexiones tipo de compresión en malla de tierra y estructuras metálicas de la subestación y sustitución de las mismas con aplicación de soldadura exotérmica.
- Relleno con material producto de la excavación en zanjas y compactado.
- Aterrizamiento de equipos eléctricos de la subestación.
- Instalación de supresor de voltajes transitorios trifásico TVSS⁴ de 200 kA clase "C" y montaje sobre muros de placas colectoras de cobre tipo EM (1/4"x4"x19) en los cuartos de control de las subestaciones.
- Instalación de varilla tipo Copperweld con cable 4/0 desnudo soldados en paralelo en barreno para formación de electrodos para redes de tierra física.
- Instalación de registro de polietileno con tapa amarilla y con logotipo de símbolo de tierra con asa de acero galvanizado y tornillería de acero inoxidable para electrodos redes de tierras dimensiones de 40 x 60 x 50 cm.
- Elaboración o actualización de planos eléctricos del sistema de puesta a tierra de la subestación de acuerdo a sus condiciones de operación después de la rehabilitación.
- Evaluación del sistema de puesta a tierra rehabilitado.
- Entrega de reporte final

⁴Transient Voltage Surge Suppressor en inglés, dispositivo utilizado para la protección de equipo electrónico sensible a sobrevoltajes transitorios con duración de unos cuantos microsegundos

5. REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN.

5.1 Excavación de zanjas.

Se inició la excavación de zanjas por medios manuales para descubrir las conexiones de compresión existentes en el sistema de puesta a tierra de la subestación.



Fig. 16 Excavación de zanjas

5.2 Sustitución de conexiones de compresión por conexiones de soldadura exotérmica.

Después de hallar la conexión de compresión se procedió a retirarlas por completo y sustituirlas por conexiones soldadas debido a que estas logran un mantener un mejor contacto entre ambos cables y prácticamente no requieren mantenimiento.

La realización de estos trabajos, se realizó de acuerdo con la especificaciones NRF-011-CFE, así como las recomendaciones IEEE Std. 80-2000, "Guide for safety in AC substation grounding".



Figs. 17 y 18 Sustitución de conexiones

5.3 Relleno con material producto de la excavación.

Una vez habiendo sustituido las conexiones de compresión halladas por conexiones con soldadura exotérmica se procedió a tapar la zanja hecha con el mismo material de relleno y compactarlo.



Fig. 19 Relleno

5.4 Puesta a tierra de estructuras y equipos eléctricos de la subestación.

Se realizó la sustitución de conexiones a tierra de todas las estructuras metálicas, así como de los equipos eléctricos ubicados en las bahías tanto de 230 kV como de 23 kV, en estos trabajos se contemplaron los siguientes equipos: Apartarrayos, Transformadores de potencia, Transformadores de potencial (TP's), Transformadores de corriente (TC's), Interruptores de potencia, Cuchillas desconectadoras y Bancos de capacitores.



Figs. 20 y 21 Puesta a tierra de equipos y estructuras



Figs. 22 y 23 Puesta a tierra de equipos y estructuras

5.5 Puesta a tierra del cuarto de control.

5.5.1 Puesta a tierra de equipo e instalación de supresor de transitorios TVSS.

Se realizó el aterrizamiento de todos los equipos instalados en el cuarto de control y su conexión al sistema principal de tierra, así como la instalación de un equipo supresor de transitorios de 200 kA en el cuarto de control para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos, electrónicos, de telecomunicaciones y alarmas instalados en caso de presentarse disturbios en la red eléctrica.



Fig. 24 Puesta a tierra de equipos en cuarto de control



Fig. 25 Instalación de TVSS

5.5.2 Anillo de tierra.

Se realizó la instalación de un anillo de tierra alrededor del cuarto de control, mismo que sirve de interconexión entre el sistema general de tierra y el sistema de puesta a tierra del cuarto de control, de esta manera se asegura el correcto funcionamiento de los equipos.



Figs. 26 y 27 Instalación de anillo de tierra

5.6. Instalación de electrodos y registros de tierra.

Se instalaron en total 4 electrodos de puesta a tierra en el anillo de tierra alrededor del cuarto de control y 5 electrodos mas fueron rehabilitados en la bahía de 23 kV de la subestación, manteniendo el sistema intacto pero mejorando su integridad y por lo tanto su buen funcionamiento en caso de fallas, así mismo se colocaron registros de tierra de alta duración hechos a base de polietileno y debidamente dimensionados para el posterior mantenimiento del sistema.



Figs. 28 y 29 Instalación de registros

5.8. Resumen.

Condiciones iniciales	Corrección.
<ul style="list-style-type: none"> Conectores mecánicos y cable de la malla de tierra presentaban alto grado de sulfatación y en algunos casos corrosión 	<p>Se sustituyeron los conectores mecánicos por conectores de soldadura exotérmica Se limpiaron las partes dañadas y se aplicó un recubrimiento con pintura epóxica como acabado</p>
<ul style="list-style-type: none"> Los equipos dentro de la caseta de control y comunicaciones se encuentran aterrizados con un cable de cobre calibre 4/0 AWG. 	<p>Se instaló un supresor de picos de voltaje transitorios (TVSS) clase "C" en tablero principal. Se aterrizaron los gabinetes de forma independiente (radial) y se conectaron en un solo punto común de acuerdo a la normas de referencia</p>
<ul style="list-style-type: none"> Algunos equipos presentaban puentes de unión en su puesta a tierra. Durante la prueba de inyección de corriente varios equipos no drenaron de manera adecuada la corriente 	<p>Se aterrizaron equipos que se encontraban sin conductor de puesta a tierra Se aterrizaron de forma radial todos los equipos que presentaban puentes de unión Se aseguró que todos los equipos tuvieran una firme conexión a la malla del sistema de puesta a tierra, así mismo se sustituyeron los conectores de compresión por conectores soldados para un mejor contacto y continuidad del sistema.</p>

Tabla No. 5 Resumen de trabajos realizados en la subestación.

6. PARTICIPACIÓN PROFESIONAL

La participación profesional que tuve en este proyecto consistió básicamente en trabajos de supervisión de personal en campo, así como trabajo de re-diseño de la red de tierra de la subestación eléctrica mediante simulaciones digitales por computadora y cálculos manuales basados en el capítulo 2.

6.1 Simulación digital del sistema de puesta a tierra

6.1.1 Datos de diseño.

Para poder simular el estado del sistema de puesta a tierra después de la rehabilitación fue necesario contar con los siguientes datos proporcionados por personal de subestaciones de la GRTC y personal de la GEIC.

Subestación Kilometro 0	
Icc,3F=	20675 Amps
Icc,1F=	20553 Amps
Resistividad del terreno sólido húmedo =	34.5 ohm-m
Resistividad del terreno sólido seco =	100 ohm-m
Resistividad de Capa superficial =	10000 ohm-m
Capa superficial =	20 cm de grava de 0.04 m y 15 cm de concreto
Profundidad de la malla =	50 cm
Calibre del conductor =	4/0 AWG

Tabla No. 6 Datos de diseño

6.1.2 Criterios de diseño.

Como ya se ha mencionado, en el diseño de un sistema de puesta a tierra de una subestación se tiene que cumplir con dos puntos importantes los cuales son:

- Asegurar que una persona que se encuentre en la vecindad de la subestación no esté fácilmente expuesta a daños o choques eléctricos críticos.
- Proporcionar un medio para disipar las corrientes eléctricas hacia tierra, sin exceder cualquier límite de operación de los equipos.

Este diseño fue simulado mediante el programa de cómputo CYME CYMGRD, para verificar que los voltajes de paso y de contacto que se producen dentro e inmediatamente fuera de los límites físicos de la subestación estén dentro de los límites del voltaje máximo permitido.

Se realizaron dos simulaciones para las condiciones de terreno húmedo y seco, tomando en cuenta el clima que impera en la ciudad de México a lo largo del año.

El tiempo de duración de falla seleccionado es de 0.3 segundos debido a que la subestación opera con equipos protecciones de última generación de la marca SEL.

6.1.3. Resultados de la simulación.

a) Condiciones de terreno húmedo (Junio-October)

A continuación se presentan los resultados dados por la simulación para condiciones de terreno húmedo con el programa CYMGRD del sistema de puesta a tierra rehabilitado de la subestación.

Reporte de análisis de la malla Sunday, January 06, 2013, 21:09:11

Nombre de la subestación	Kilómetro 0
Proyecto	S.E. Km 0
Estudio	S.E. Kilometro 0

Parámetros

Spec. Z paralelo equivalente	Z infinito
Frecuencia nominal	60 hz
Nombre de la barra	230
Corriente de falla LG	20553 amps
Contribución a distancia	100 %
Espesor de la capa superior	100 metros
Resistividad de la capa superior	34.5 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	34.5 ohm-m

Resultados de salida

Elevación del potencial de tierra	3161.09 voltios
Resistencia de tierra calculada	0.147425 ohmios
Impedancia equivalente	0.147422 ohmios

Reporte del análisis de suelo Wednesday, December 19, 2012, 15:33:22

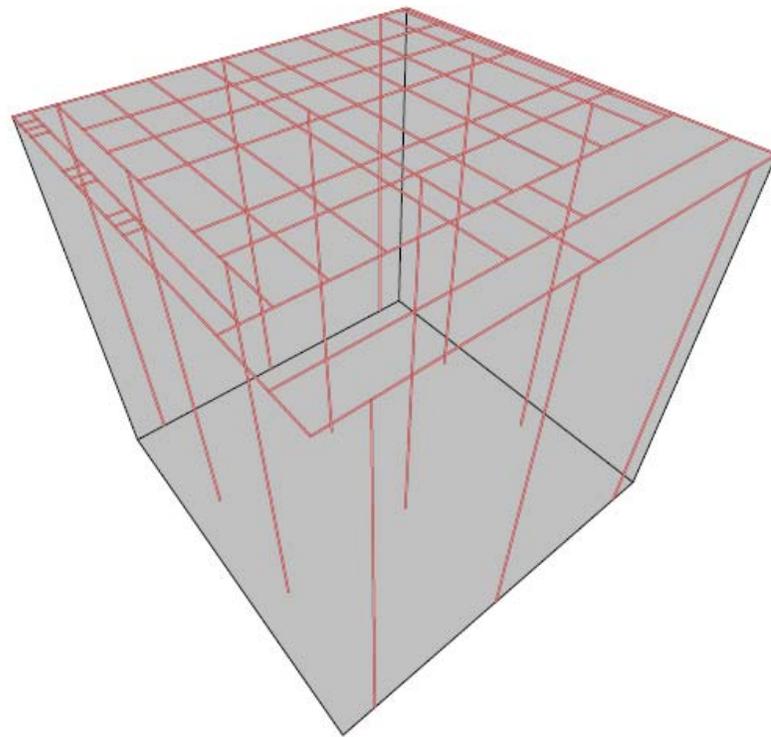
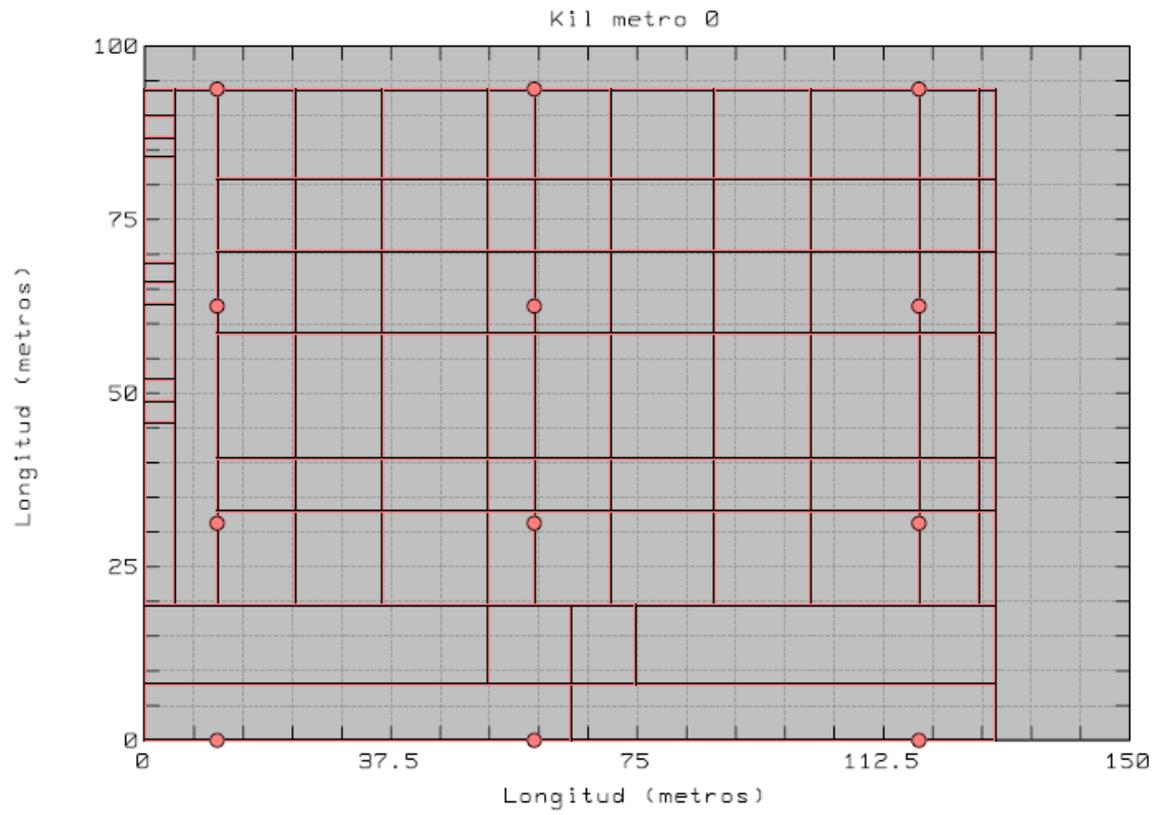
Nombre de la subestación	Kilómetro 0
Proyecto	S.E. Km 0
Estudio	S.E. Kilometro 0

Parámetros

Título	Terreno Km 0
Modelo de suelo	Uniforme
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.2 metros
Resistividad de la capa superficial	10000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.3 secs

Resultados de salida

Espesor de la capa superior	100 metros
Resistividad de la capa superior	34.5 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	34.5 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.816934
Tensión máxima de contacto	2807.02 voltios
Tensión máxima de paso	10592.7 voltios



Figs. 32 y 33 Construcción del estado del sistema de puesta a tierra

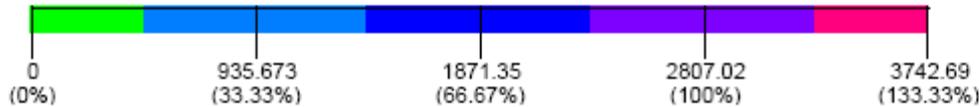
Nombre de la subestación Kilómetro 0
 Proyecto S.E. Km 0
 Estudio S.E. Kilometro 0

Parámetros

Título Diagrama de contorno de potencial #03
 Nombre de la barra 230
 Corriente de falla LG 20553 amps
 Contribución a distancia 100 %
 Corriente del electrodo de return 0 amps
 Espesor de la capa superior 100 metros
 Resistividad de la capa superior 34.5 ohm-m
 Resistividad de la capa inferior 34.5 ohm-m
 Potenciales iguales (distintos) Sí
 X1 0 metros
 Y1 0 metros
 X2 129.4 metros
 Y2 93.8 metros
 Intervalos X 10
 Intervalos Y 10

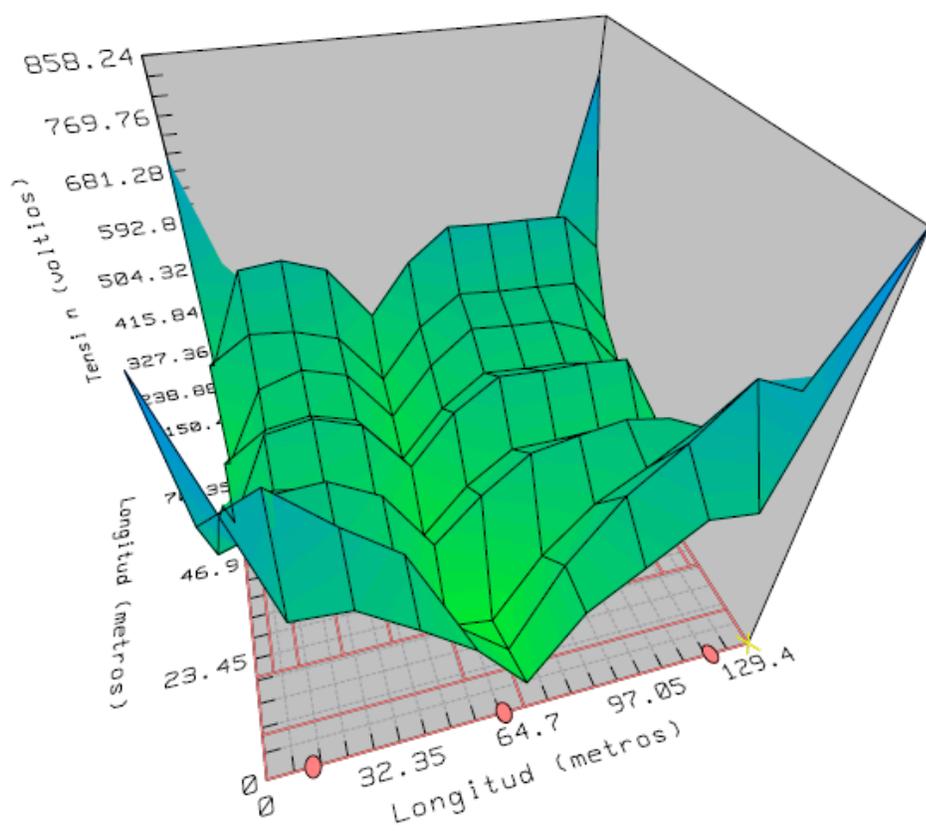
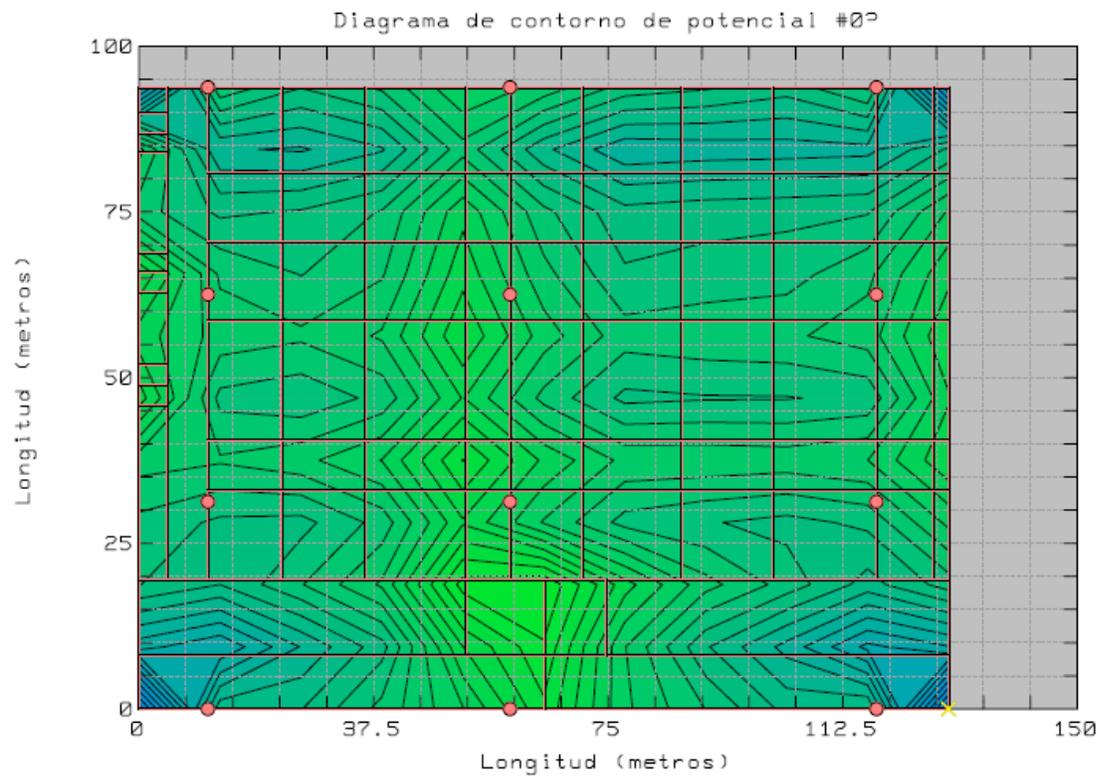
Niveles de umbral del potencial de contacto

Tensión máxima de contacto 2807.02 voltios



Máximo

Potencial de contacto en los puntos 858.244 voltios Corriente LT Permitida 67220.5 amps



Figs. 34 y 35 Potencial de contacto

Nombre de la subestación	Kilómetro 0
Proyecto	S.E. Km 0
Estudio	S.E. Kilometro 0

Parámetros

Título	Diagrama de perfil de potencial #03
--------	-------------------------------------

Nombre de la barra	230
Corriente de falla LG	20553 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Espesor de la capa superior	100 metros
Resistividad de la capa superior	34.5 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	34.5 ohm-m
Potenciales iguales (distintos)	Sí

X1	0 metros
Y1	0 metros
X2	129.4 metros
Y2	93.8 metros

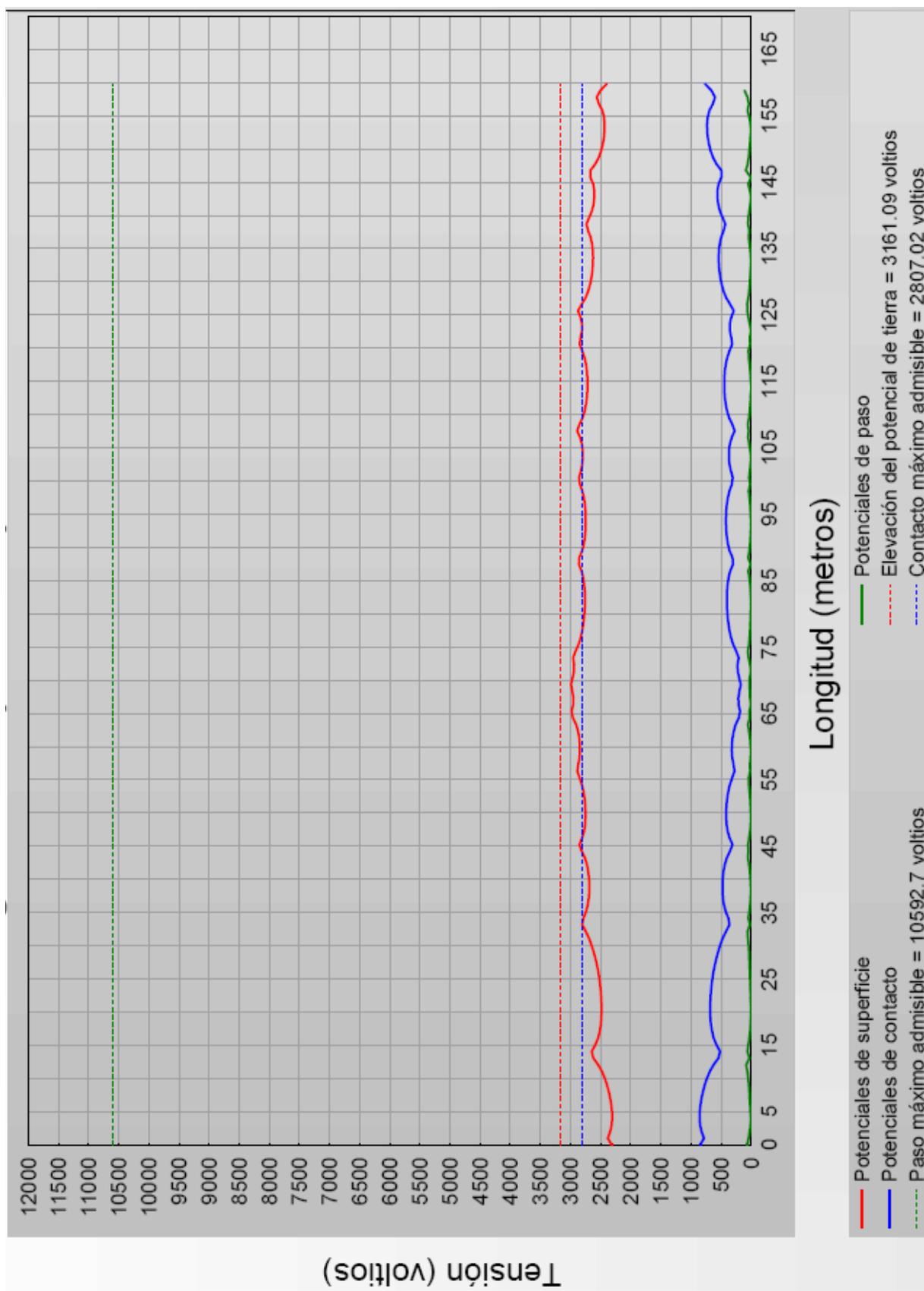
Intervalo entre los pasos	1 metros
---------------------------	----------

Niveles de umbral del potencial de contacto

Elevación del potencial de tierra	3161.09 voltios
Tensión máxima de paso	10592.7 voltios
Tensión máxima de contacto	2807.02 voltios

Máximo

Potenciales de superficie	2989.87 voltios
Potenciales de paso	107.15 voltios
Potenciales de contacto	854.778 voltios



Tensión (voltios)

Fig. 36 Diagrama de potenciales

Longitud (metros)

Resumen de los datos obtenidos en el programa CYMGRD:

Resultados Simulación S.E. Kilometro 0 terreno húmedo	
Resistencia de la malla de tierra =	0.147 Ω
Potencial de malla =	3161.09 Volts
Voltaje de paso tolerable (50 Kg) =	10592.7 Volts
Voltaje de contacto tolerable (50 Kg) =	2807.02 Volts
Voltaje de paso de la malla =	107.15 Volts
Voltaje de contacto del sistema =	854.77 Volts

Tabla No. 7 Resultados de la simulación para terreno húmedo

a) Condiciones de terreno seco (Noviembre-Mayo)

A continuación se presentan los resultados dados por la simulación para condiciones de terreno seco con el programa CYMGRD del sistema de puesta a tierra rehabilitado de la subestación.

Reporte de análisis de la malla Sunday, January 06, 2013, 21:29:34

Nombre de la subestación	Kilómetro 0
Proyecto	S.E. Km 0 2
Estudio	S.E. Kilometro 0

Parámetros

Spec. Z paralelo equivalente	Z infinito
Frecuencia nominal	60 hz
Nombre de la barra	230
Corriente de falla LG	20553 amps
Contribución a distancia	100 %
Espesor de la capa superior	100 metros
Resistividad de la capa superior	100 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	100 ohm-m

Resultados de salida

Elevación del potencial de tierra	9162.32 voltios
Resistencia de tierra calculada	0.427317 ohmios
Impedancia equivalente	0.427299 ohmios

Reporte del análisis de suelo Wednesday, December 19, 2012, 15:34:17

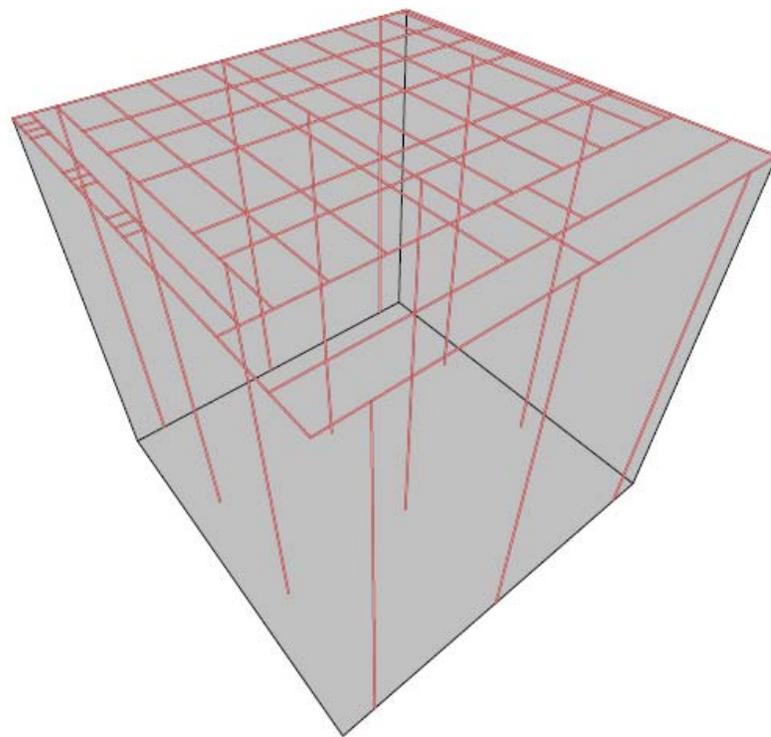
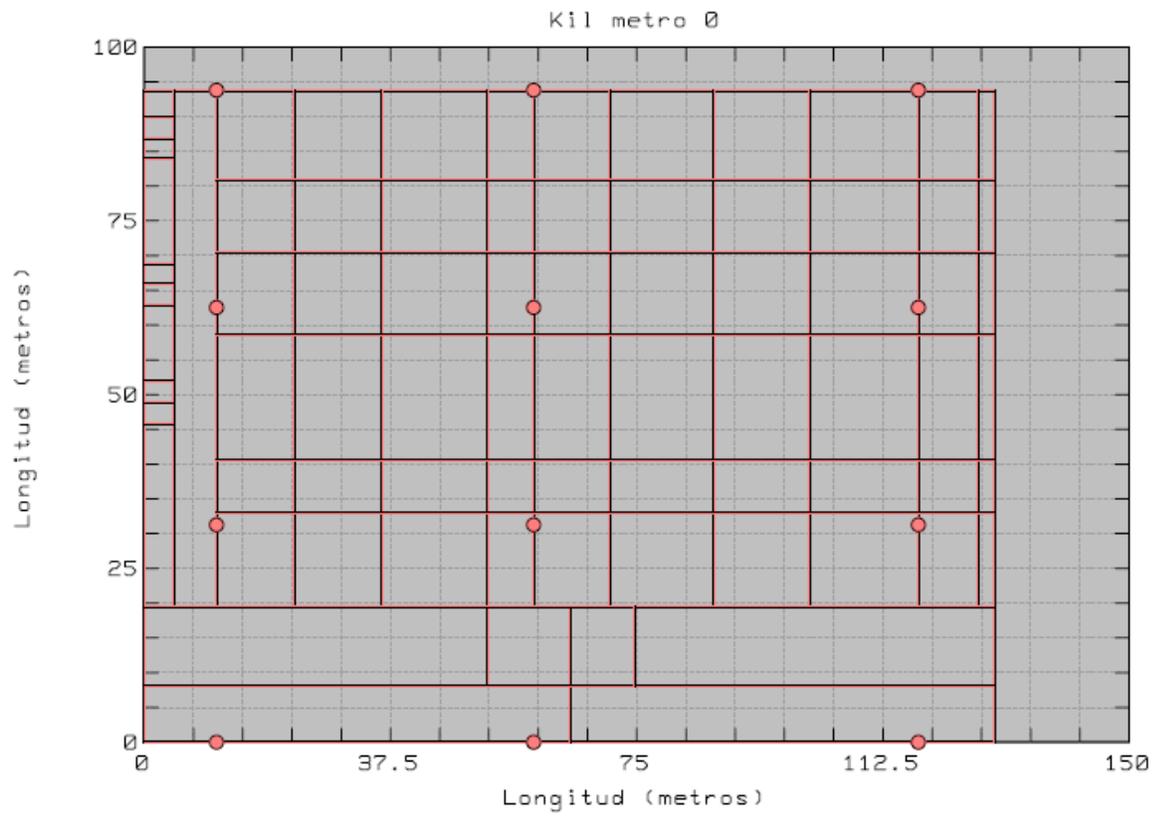
Nombre de la subestación	Kilómetro 0
Proyecto	S.E. Km 0 2
Estudio	S.E. Kilometro 0

Parámetros

Título	Terreno Km 0
Modelo de suelo	Uniforme
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.2 metros
Resistividad de la capa superficial	10000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.3 secs

Resultados de salida

Espesor de la capa superior	100 metros
Resistividad de la capa superior	100 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	100 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.818055
Tensión máxima de contacto	2810.58 voltios
Tensión máxima de paso	10607 voltios



Figs. 37 y 38 Construcción del estado del sistema de puesta a tierra

Reporte de contorno de potencial

Sunday, January 06, 2013, 21:29:48

Nombre de la subestación Kilómetro 0
Proyecto S.E. Km 0 2
Estudio S.E. Kilometro 0

Parámetros

Título Diagrama de contorno de potencial #04

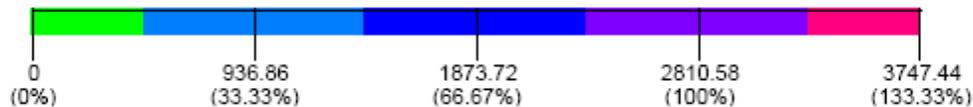
Nombre de la barra 230
Corriente de falla LG 20553 amps
Contribución a distancia 100 %
Corriente del electrodo de retorn 0 amps
Espesor de la capa superior 100 metros
Resistividad de la capa superior 100 ohm-m
Resistividad de la capa inferior 100 ohm-m
Potenciales iguales (distintos) Sí

X1 0 metros
Y1 0 metros
X2 129.4 metros
Y2 93.8 metros

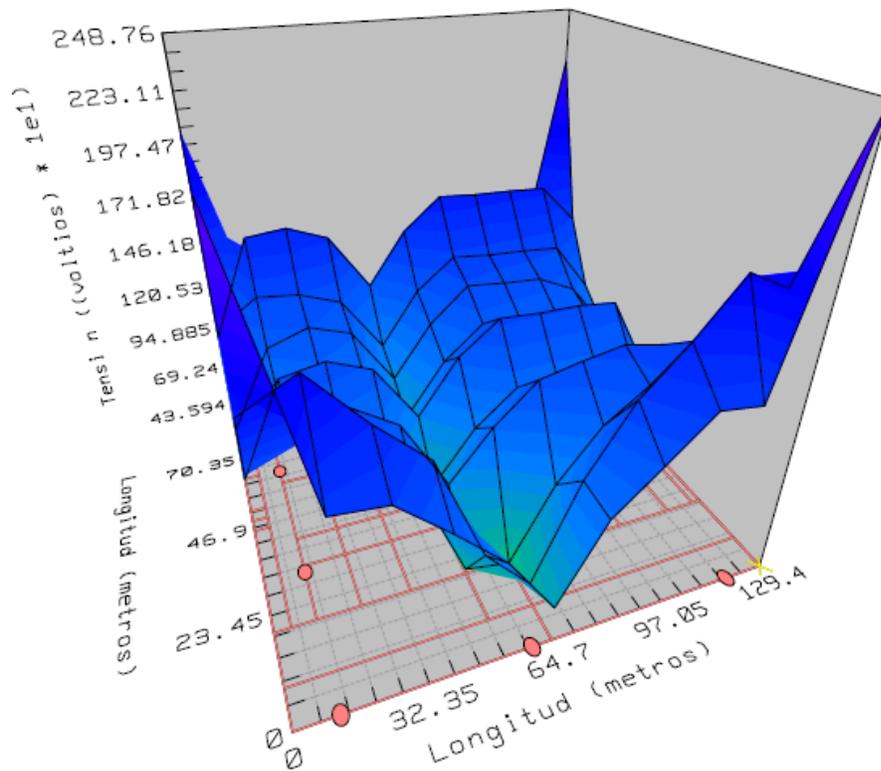
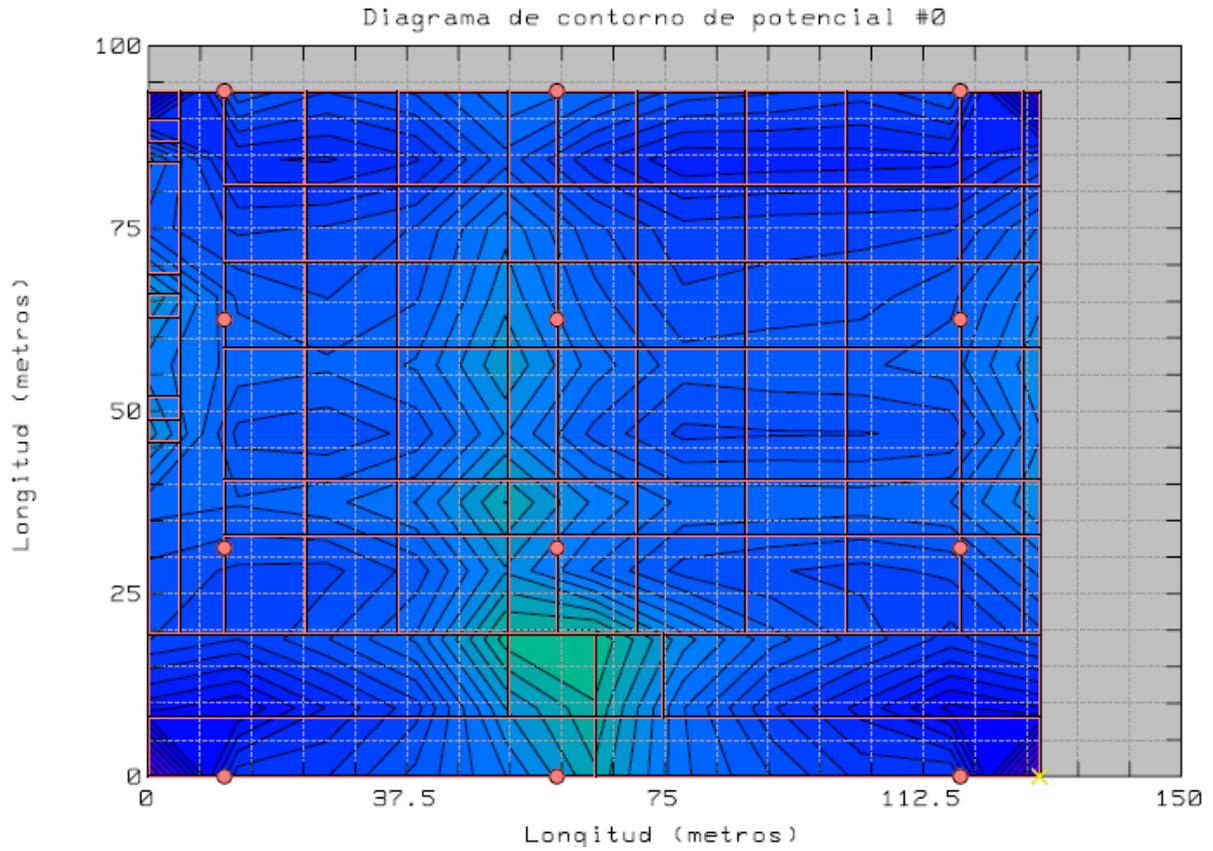
Intervalos X 10
Intervalos Y 10

Niveles de umbral del potencial de contacto

Tensión máxima de contacto 2810.58 voltios

**Máximo**

Potencial de contacto en los puntos 2487.59 voltios Corriente LT Permitida 23220.5 amps



Figs. 39 y 40 Potencial de contacto

Nombre de la subestación	Kilómetro 0
Proyecto	S.E. Km 0 2
Estudio	S.E. Kilometro 0

Parámetros

Título	Diagrama de perfil de potencial #04
--------	-------------------------------------

Nombre de la barra	230
Corriente de falla LG	20553 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Espesor de la capa superior	100 metros
Resistividad de la capa superior	100 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	100 ohm-m
Potenciales iguales (distintos)	Sí

X1	0 metros
Y1	0 metros
X2	129.4 metros
Y2	93.8 metros

Intervalo entre los pasos	1 metros
---------------------------	----------

Niveles de umbral del potencial de contacto

Elevación del potencial de tierra	9162.32 voltios
Tensión máxima de paso	10607 voltios
Tensión máxima de contacto	2810.58 voltios

Máximo

Potenciales de superficie	8666.04 voltios
Potenciales de paso	310.58 voltios
Potenciales de contacto	2477.56 voltios

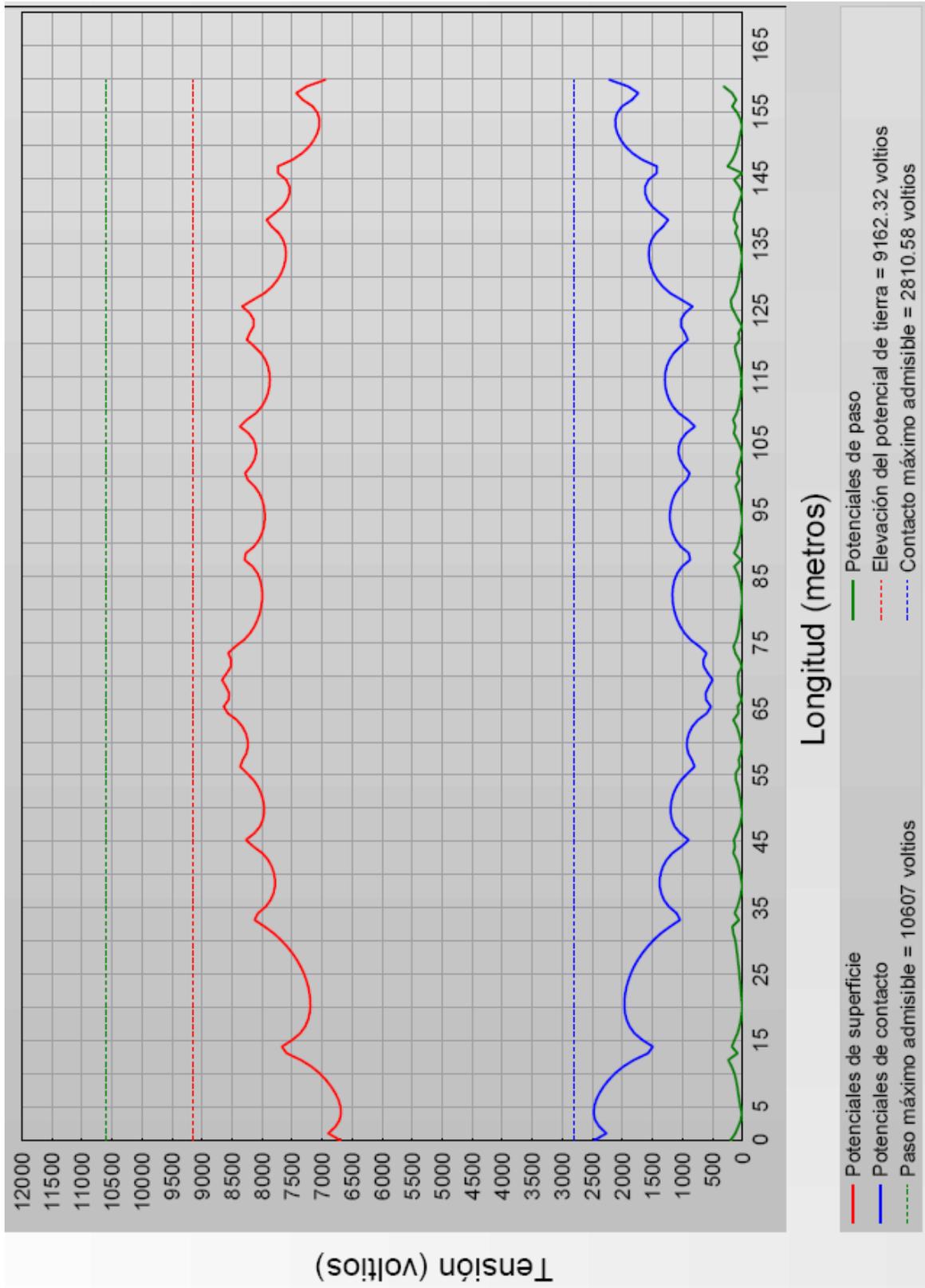


Fig.41 Diagrama de potenciales

Resumen de los datos obtenidos en el programa CYMGRD:

Resultados Simulación S.E. Kilometro 0 terreno seco	
Resistencia de la malla de tierra =	0.427 Ω
Potencial de malla =	9162.32 Volts
Voltaje de paso tolerable (50 Kg) =	10607 Volts
Voltaje de contacto tolerable (50 Kg) =	2810.58 Volts
Voltaje de paso de la malla =	310.58 Volts
Voltaje de contacto del sistema =	2477.56 Volts

Tabla No. 8 Resultados de la simulación para terreno seco

6.1.4. Hoja de cálculo para condición húmeda.

1.- Cálculo de la sección del conductor de red.

Constante de tiempo subtransitoria equivalente:

Relación X/R = 10

Constante de tiempo subtransitoria: $T_s = 0.0004421$ seg

$$T_s = \frac{X''}{\omega R}$$

Duración de la falla en segundos: $T_f = 0.3$ seg

Factor de decremento: $D_F = 1.0007366$

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_s}{T_f} [1 - e^{-2T_f/T_s}]}$$

Factor de proyección: $C_p = 1$

Corriente máxima de la malla: $I_g = 20568.138$ A

$$I_G = (C_p)(D_F)(I_g)$$

Conectores mecánicos a 250° $K_F = 7.06$ De tabla 2 IEEE Std 80-2000

Sección del conductor en KCM: $A_{KCM} = 79.535372$ KCM $d = 0.01$

$$A_{KCM} = (I_G)(K_F)(\sqrt{T_f})$$

La subestación eléctrica KM 0 cuenta con cable calibre 4/0 AWG (211.60 KCM) y diametro de 0.0134 m

2.- Cálculo de potenciales tolerables.

Se contempla una capa adicional de resistividad superior en el terreno:

Resistividad del terreno (ρ) = 34.5 $\Omega \cdot \text{m}$

Resistividad de la capa superior (ρ_s) = 10000 $\Omega \cdot \text{m}$ (Grava) una capa de 0.20 m.

Factor de reducción C_s

Factor de reflexión $\rho = -0.9931237$

Factor de reducción C_s , $C_s = 0.8169602$

Resistencia del cuerpo humano: $R_B = 1000$ Ω

Potencial de paso tolerable (50 kg): $E_{\text{paso}50} = 10593.03$ V

$$E_{\text{paso}50} = (R_B + 6C_s\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T_s}} \right)$$

Potencial de contacto tolerable (50 kg): $E_{\text{cont}50} = 2807.10$ V

$$E_{\text{cont}50} = (R_B + 1.5C_s\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T_s}} \right)$$

3.- Diseño de la subestación (aproximado).

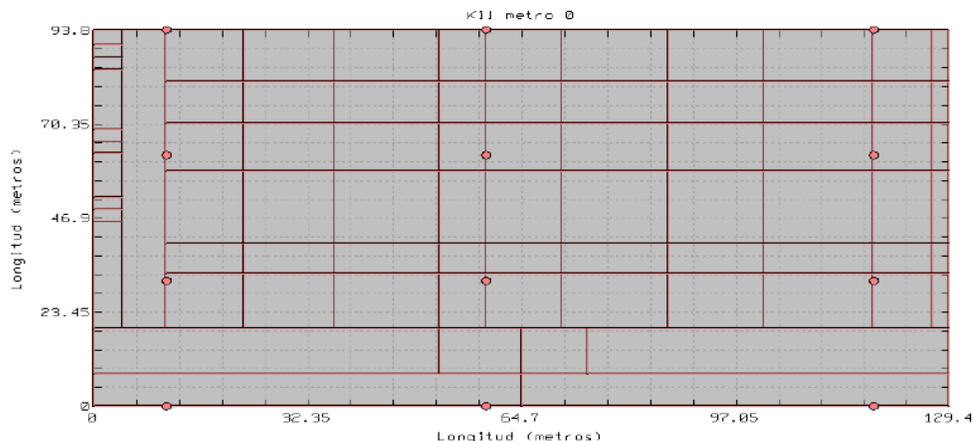
Area: 133.5 m x 95.5 m = 12749 m²

Conductores paralelos = 11 Logitud de conductores = 2252 m Espaciamiento = 30

Conductores transversales = 9 Logitud de varillas = 42 m

Varillas de tierra = 12 Profundidad de la malla = 0.5 m

Longitud Total = 2294 m Periferia = 458



4.- Valores de la malla de tierra.

Resistencia de la malla de tierra.	$R_G =$	0.17	
Corriente maxima de la malla.	$I_G =$	20568.14	A
GPR.	$GPR =$	3395.88	V

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

5.- Calculo de potenciales de malla.

Calculo de n_A .	$n_A =$	9.8341	
	$n_B =$	1.0070	
	$n_C =$	1.0000	
	$n_D =$	1.0000	
	$n =$	9.9029	

$$n_A = \frac{(2)(L_c)}{L_p}$$

$$n_B = \sqrt{\frac{L_p}{(4)(\sqrt{A})}}$$

Calculo de K_{ij} .	$K_{ij} =$	0.6057	
-----------------------	------------	--------	--

Calculo de K_h .	$K_h =$	1.2247	
--------------------	---------	--------	--

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Calculo de L_M .	$L_M =$	2254.1263	m
--------------------	---------	-----------	---

$$L_M = L_c \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{Lx^2 + Ly^2}} \right) \right] L_r$$

Calculo de L_S .	$L_S =$	1724.7000	m
--------------------	---------	-----------	---

$$L_S = (0.75L_c) + (0.85L_r)$$

Calculo de K_m .	$K_m =$	1.2860512	
--------------------	---------	-----------	--

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_h}{K_b} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

Calculo de K_i .	$K_i =$	2.1096363	
--------------------	---------	-----------	--

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

Calculo de potencial de malla.	$E_m =$	854.08611	V
--------------------------------	---------	------------------	---

$$E_m = \frac{(\rho)(K_m)(K_i)(I_G)}{L_M}$$

Calculo de K_S .	$K_S =$	0.1351752	
--------------------	---------	-----------	--

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \right) (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

Calculo de potencial de paso.	$E_S =$	117.32892	V
-------------------------------	---------	------------------	---

$$E_S = \frac{(\rho)(K_S)(K_i)(I_G)}{L_S}$$

6.- Conclusiones.

$$E_{m(V)} = 854.09 < E_{cont.50(V)} = 2807.10 \quad R_{G(0)} = 0.17$$

$$E_{S(V)} = 117.33 < E_{paso50(V)} = 10593.03$$

Por lo cual el sistema es seguro y cumple con las especificaciones y recomendaciones dadas por la norma IEEE Std 80-2000

6.1.5. Hoja de cálculo para condición seca.

MEMORIA DE CALCULO SISTEMA DE TIERRA

1.- Cálculo de la sección del conductor de red.

Constante de tiempo subtransitoria equivalente:

Relación X/R = 10

Constante de tiempo subtransitoria: $T_s = 0.0004421$ seg

$$T_s = \frac{X''}{\omega R}$$

Duración de la falla en segundos: $T_F = 0.3$ seg

Factor de decremento: $D_F = 1.0007366$

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_s}{T_F} [1 - e^{-2\pi/T_s}]}$$

Factor de proyección: $C_F = 1$

Corriente máxima de la malla: $I_G = 20568.138$ A

$$I_G = (C_F)(D_F)(I_B)$$

Conectores mecánicos a 250°: $K_F = 7.06$ De tabla 2 IEEE Std 80-2000

Sección del conductor en KCM: $A_{KCM} = 79.535372$ KCM $d = 0.01$

$$A_{KCM} = (I_G)(K_F)(\sqrt{T_F})$$

La subestación eléctrica KM 0 cuenta con cable calibre 4/0 AWG (211.60 KCM) y diámetro de 0.0134 m

2.- Cálculo de potenciales tolerables.

Se contempla una capa adicional de resistividad superior en el terreno:

Resistividad del terreno (ρ) = 100 $\Omega \cdot \text{m}$

Resistividad de la capa superior (ρ_s) = 10000 $\Omega \cdot \text{m}$ (Grava) una capa de 0.20 m.

Factor de reducción C_s

Factor de reflexión = -0.980198

Factor de reducción C_s : $C_s = 0.8181633$

Resistencia del cuerpo humano: $R_B = 1000$ Ω

Potencial de paso tolerable (50 kg): $E_{paso50} = 10608.32$ V

$$E_{paso50} = (R_B + 6C_s\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T_s}} \right)$$

Potencial de contacto tolerable (50 kg): $E_{cont.50} = 2810.92$ V

$$E_{contacto50} = (R_B + 1.5C_s\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T_s}} \right)$$

3.- Diseño de la subestación (aproximado).

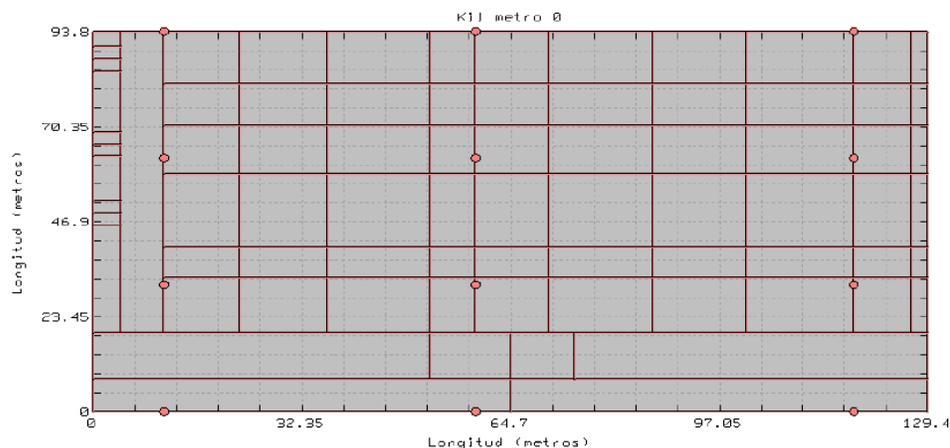
Area: 133.5 m x 95.5 m = 12749 m²

Conductores paralelos = 11 Logitud de conductores = 2252 m Espaciamiento = 30

Conductores transversales = 9 Logitud de varillas = 42 m

Varillas de tierra = 12 Profundidad de la malla = 0.5 m

Longitud Total = 2294 m Periferia = 458



4.- Valores de la malla de tierra.

Resistencia de la malla de tierra.	$R_G =$	0.48	
Corriente maxima de la malla.	$I_G =$	20568.14	A
GPR.	$GPR =$	9843.14	V

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

5.- Calculo de potenciales de malla.

Calculo de n.	$n_A =$	9.8341	
	$n_B =$	1.0070	
	$n_C =$	1.0000	
	$n_D =$	1.0000	
	$n =$	9.9029	
Calculo de K_{ij} .	$K_{ij} =$	0.6057	
Calculo de K_h .	$K_h =$	1.2247	
Calculo de L_M .	$L_M =$	2254.1263	m
Calculo de L_S .	$L_S =$	1724.7000	m
Calculo de K_m .	$K_m =$	1.2860512	
Calculo de K_i .	$K_i =$	2.1096363	
Calculo de potencial de malla.	$E_m =$	2475.6119	V
Calculo de K_S .	$K_S =$	0.1351752	
Calculo de potencial de paso.	$E_S =$	340.08382	V

$$n_A = \frac{(2)(L_c)}{L_p}$$

$$n_B = \sqrt{\frac{L_p}{(4)(\sqrt{A})}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$L_M = L_c \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{Lx^2 + Ly^2}} \right) \right] L_R$$

$$L_S = (0.75L_c) + (0.85L_R)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_a}{K_b} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$E_m = \frac{(\rho)(K_m)(K_i)(I_G)}{L_M}$$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \right) (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

$$E_S = \frac{(\rho)(K_S)(K_i)(I_G)}{L_S}$$

6.- Conclusiones.

$$E_{m(V)} = 2475.6 < E_{cont.50(V)} = 2810.92 \quad R_{G(\Omega)} = 0.48$$

$$E_{S(V)} = 340.08 < E_{paso50(V)} = 10608.32$$

Por lo cual el sistema es seguro y cumple con las especificaciones y recomendaciones dadas por la norma IEEE Std 80-2000

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la rehabilitación son los siguientes:

Una vez rehabilitado el sistema de puesta a tierras, en promedio se tiene que actualmente en la subestación Kilometro 0 el 92% de la corriente de falla se drena adecuadamente a la red general de tierras, lo cual representa una mejora significativa en la confiabilidad y seguridad del sistema.

Derivado del volumen de excavación se determinó la topología exacta de la red de tierras existente en la subestación rehabilitada, lo cual permite tener el plano actualizado de la misma.

La instalación, calidad de materiales, resultados y diseños cumplen con lo establecido en las normas de referencia NRF-011-CFE, IEEE Std. 81 -1983, IEEE Std. 80 -2000 y la especificación CFE-00J00-01.

Los niveles de potencial de paso y contacto en las subestación no superan los niveles tolerables por el cuerpo humano ya que para condiciones húmedas del terreno en el caso del voltaje de paso se tienen $107.15 \text{ V} < 10592.7 \text{ V}$ y en el caso del voltaje de contacto $854.77 \text{ V} < 2807.02 \text{ V}$, por otro lado para condiciones de terreno seco se tiene en el caso del voltaje de paso se tienen $310.58 \text{ V} < 10607 \text{ V}$ y en el caso del voltaje de contacto $2477.56 \text{ V} < 2810.58 \text{ V}$. En las simulaciones se puede observar que existen diferencias de potencial mínimas en áreas de bahías, esto derivado a la correcta geometría de la malla y a que todas las estructuras metálicas se encuentran aterrizadas.

Finalmente los valores de resistencia calculados mediante las simulaciones no superan el valor recomendable de 1 ohm como lo indica la NRF-011-CFE para subestaciones eléctricas de transmisión.

8. BIBLIOGRAFIA.

- **IEEE Std 80-2000 “Guide for Safety in AC Substation Grounding”**, IEEE, New York, 2000.
- **IEEE Std 81-1983 “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System”**, IEEE, New York, 1983.
- **NRF-011-CFE-2004 Sistemas de tierra para plantas y subestaciones eléctricas**, 1^{ra} Edición, 2005
- **NFPA-70E-2004 Standard for electrical safety requirements for employee workplaces**, National Fire Protection Association, Reno NV, 2004
- **Manual de Diseño de Subestaciones, *Diseño de Redes de Tierra***, Ingeniería Eléctrica, Gerencia de Planeación e Ingeniería. Edit. Relaciones Industriales, Compañía de Luz y Fuerza del Centro, 1975.
- **CFE-00J00-01**. Recomendaciones para el cálculo preliminar de redes de tierra en plantas y subestaciones eléctricas.
- **Reglamento de seguridad e higiene en el trabajo Capítulo 800 Transmisión**, Comisión Federal de Electricidad, 2004

