



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
Comisión Federal de Electricidad

**Servicio de Medición, Evaluación,
Diagnóstico y Rehabilitación del
Sistema de Tierra Física de
Subestaciones Eléctricas**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES
para obtener el título de
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

PRESENTA:

Jahasiel Concepción Tavera Hurtado

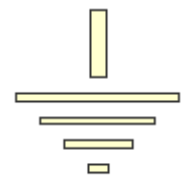
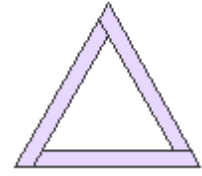
ASESOR:

Ing. Luis Armando Martínez Romero



México D.F. Junio 2013

Gracias a Dios
y a mis padres.



PRÓLOGO

El presente Informe es para cumplir con el requisito de titulación por medio de la opción de “Experiencia Profesional”. Mi trabajo de Auxiliar Técnico fue desempeñado para la Comisión Federal de Electricidad, en las Subestaciones Eléctricas del área metropolitana de la Ciudad de México, realizando la supervisión de la Rehabilitación del Sistema de Tierra Física.

En primer lugar, refiero los principios teóricos del Sistema de Tierra Física, así como los fenómenos adversos que causa la corriente eléctrica que circula a través del cuerpo humano, enseguida describo mi participación profesional dentro de la Rehabilitación del Sistema de Tierra, finalmente muestro los resultados y aportaciones de los trabajos realizados en las Subestaciones Eléctricas junto con mis conclusiones.

Además, para complementar el informe, presento dos apéndices, uno de cálculos básicos del diseño del Sistema de Tierra Física y otro de memoria fotográfica de la Rehabilitación del Sistema de Tierra Física.

Índice

1 INTRODUCCIÓN 1

2 OBJETIVO..... 1

3 MARCO TEÓRICO 2

 3.1 Introducción al sistema de tierra 2

 3.1.1 Sistema radial 3

 3.1.2 Sistema de anillo 3

 3.1.3 Sistema de malla..... 4

 3.2 Elementos de la red de tierra 4

 3.2.1 Conductores..... 4

 3.2.2 Electrodo..... 4

 3.2.3 Conectores 6

 3.2.3.1 Conectores atornillados 6

 3.2.3.2 Conectores a presión 7

 3.2.3.3 Zapatas..... 7

 3.2.3.4 Conectores soldados..... 7

 3.2.4 Moldes de grafito..... 8

 3.2.5 Soldadura 9

 3.2.6 Intensificador químico..... 9

 3.2.7 Pasta anticorrosión 9

 3.3 Factores considerados en el diseño del Sistema de Tierra..... 9

 3.3.1 Resistividad del terreno..... 9

 3.3.1.1 Medición de la resistividad 10

 3.3.2 Seguridad eléctrica en el sistema de tierra..... 11

 3.3.2.1 Tensión de contacto 12

 3.3.2.2 Tensión de paso..... 12

 3.3.2.3 Tensión de malla..... 13

 3.3.2.4 Tensión transferida..... 13

 3.4 Efectos fisiológicos de la electricidad..... 13

 3.4.1 Umbral de percepción 14

 3.4.2 Contracción muscular..... 15

 3.4.3 Parálisis respiratoria, dolor y fatiga 15

3.4.4	Fibrilación ventricular.....	15
3.4.5	Contracción sostenida del miocardio.....	16
3.4.6	Quemaduras y lesiones físicas.....	16
3.5	Variabilidad del umbral de percepción y de la contracción muscular.....	16
3.6	El factor de la frecuencia eléctrica.....	17
3.7	Puntos de entrada y salida de la corriente eléctrica.....	18
4	ANTECEDENTES DEL TEMA.....	18
5	CONTEXTO DE LA PARTICIPACIÓN PROFESIONAL.....	20
5.1	Dibujar el plano arquitectónico de la subestación.....	21
5.2	Medir la resistividad del terreno.....	21
5.3	Diseñar la red de tierra.....	21
5.4	Cortar, romper, retirar concreto.....	21
5.5	Excavar tierra.....	21
5.6	Colocar los cables de la malla de tierra.....	21
5.7	Soldar cada uno de los cruces de la malla de tierra.....	21
5.8	Conectar toda estructura metálica a la malla de tierra.....	22
5.9	Pintar todas las uniones del exterior.....	22
5.10	Rellenar la excavación.....	22
5.11	Reponer el concreto extraído.....	22
5.12	Limpiar la zona de trabajo.....	22
5.13	Escribir un informe final de los trabajos realizados.....	22
6	ANÁLISIS Y METODOLOGÍA EMPLEADA.....	22
7	PARTICIPACIÓN PROFESIONAL.....	32
8	RESULTADOS Y APORTACIONES.....	42
9	CONCLUSIONES.....	43
	APÉNDICE 1.....	45
	Memoria de cálculo de la red de tierra.....	45
	APÉNDICE 2.....	54
	Memoria fotográfica de la rehabilitación de la red de tierra.....	54
	Inspeccionar la zona.....	54
	Romper.....	55
	Excavar.....	55
	Localizar.....	56
	Perforar.....	56

Suministros.....	57
Rehabilitar cruces.....	57
Colocar Electrodo.....	58
Colocar cable	58
Aterrizar estructuras directamente	59
Aterrizar estructuras con zapata.....	59
Fijar.....	60
Limar.....	60
Pintar	61
Rellenar.....	61
Reponer	62
Limpiar	62
Oportunidades	63
Coordinación con otros proyectos.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	65

SERVICIO DE MEDICIÓN, EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE TIERRA FÍSICA DE SUBESTACIONES ELECTRICAS.

1 INTRODUCCIÓN

De todas las formas de energía conocidas en la actualidad, la más empleada es la energía eléctrica debido a su gran versatilidad.

La posibilidad de que la energía eléctrica se pueda transmitir a grandes distancias y a un bajo costo, hace posible explotar distintos tipos de fuentes de energía que se encuentran muy alejados de los centros de consumo.

El Sistema Eléctrico de Potencia está formado por tres partes principales: generación, transmisión y distribución.

Las Subestaciones Eléctricas son las encargadas de interconectar líneas de transmisión de distintas centrales generadoras y transformar los niveles de voltaje para su transmisión y consumo (Fig. 1).

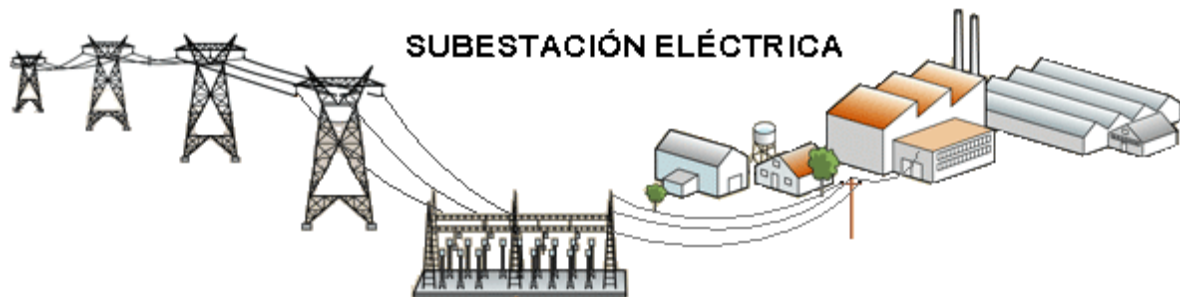


Figura 1. A la izquierda las torres de transmisión, a la derecha los centros de consumo y al centro la Subestación Eléctrica.

Las Subestaciones Eléctricas son susceptibles de fallas debido a condiciones atmosféricas adversas o a disturbios del sistema eléctrico, por lo que es necesario salvaguardar las instalaciones y la vida de los trabajadores con un Sistema de Tierra Física eficaz.

2 OBJETIVO

El objetivo de tener una red de tierra en las subestaciones eléctricas, es aumentar la confiabilidad eléctrica y asegurar la integridad física del personal y los equipos instalados, ante condiciones anormales provocados por fallas de corto circuito,

apertura y cierre de interruptores o descargas atmosféricas dentro de las instalaciones.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Introducción al sistema de tierra¹

Uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones en las subestaciones, es el de disponer de una red de tierra adecuada, a la que se conecten los neutros de los aparatos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquellas partes metálicas que deben permanecer al potencial de tierra.

La necesidad de contar con una red de tierra en las subestaciones, es la de cumplir con las siguientes funciones:

- Limitar las sobretensiones por operación de interruptores o por descargas atmosféricas.
- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, ya sea que se deban a una falla de cortocircuito o a la operación de un pararrayo.
- Evitar que durante la circulación de corrientes de tierra en condiciones de cortocircuito puedan producirse gradientes de potencial entre distintos puntos de la subestación, lo que se traduce como un peligro para el personal.
- Servir como punto de referencia de relevadores para la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.
- Dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.

En la red de tierra se consideran tres sistemas:

- Radial
- Anillo
- Malla

¹ Basado en el Diseño de Redes de Tierra del libro del Ing. José Raúl Martín.

3.1.1 Sistema radial

Este sistema es el más económico, pero el menos seguro ya que al producirse una falla en cualquier parte de la subestación se generan altos gradientes de potencial. Se utiliza para corrientes de tierra bajas.

El sistema consiste en uno o varios electrodos, de los cuales se conectan las derivaciones a cada aparato eléctrico (Fig. 2).

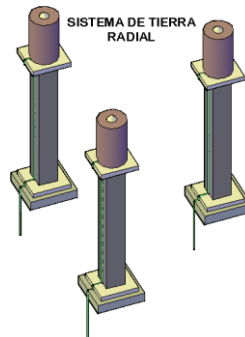


Figura 2. Diagrama de sistema de tierra radial (fuente: Raúll Martín, José. Diseño de Redes de Tierra).

3.1.2 Sistema de anillo

Consiste en instalar un cable de cobre de suficiente calibre alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación, conectando derivaciones a cada aparato mediante otro cable; si el anillo es cuadrado conviene conectar electrodos de tierra en sus vértices, ya que es en las esquinas donde se concentra la energía eléctrica. Es un sistema menos económico que el anterior. Los potenciales peligrosos disminuyen al disiparse la corriente de falla por varios caminos, lo que origina menores gradientes de potencial. Se utiliza cuando no es posible instalar el sistema de malla (Fig. 3).

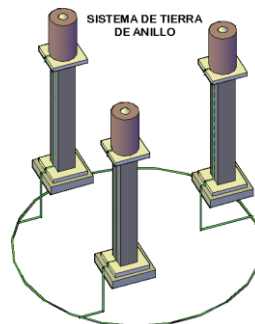


Figura 3. Diagrama de sistema de tierra de anillo (fuente: Raúll Martín, José. Diseño de Redes de Tierra).

3.1.3 Sistema de malla

Es el más utilizado en los sistemas eléctricos ya que es el más seguro de todos y consiste, como su nombre lo indica, en una retícula formada por cable de cobre, conectada a través de electrodos de varillas de *copperweld* a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficiente, pero también el más caro de los tres (Fig. 4).

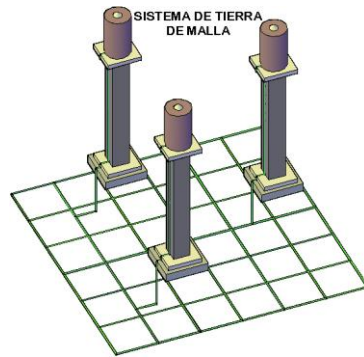


Figura 4. Diagrama de sistema de tierra de malla (fuente: Raúl Martín, José. Diseño de Redes de Tierra).

3.2 Elementos de la red de tierra

3.2.1 Conductores

Los conductores que se utilizan en la red de tierra son de cable de cobre. Por razones mecánicas se escoge como mínimo el calibre de $4/0$ AWG pues, eléctricamente pueden usarse cables de cobre a partir del número 2 AWG. Para el sistema de malla se usa cable de $4/0$ AWG y para sistemas en anillo se compensa la menor cantidad de cable enterrado, aumentando su calibre a 1000 [kcmil], aunque el calibre adecuado es el que arroja el análisis de la resistividad del terreno y la corriente de corto circuito de la Subestación Eléctrica.

Se utiliza el cobre por su mejor conductividad eléctrica y térmica pero sobre todo, por su gran resistencia a la corrosión.

3.2.2 Electrodo

Son varillas que se clavan en el terreno y sirven para aumentar la longitud del conductor de la red de tierra en terrenos pequeños o en terrenos secos, para encontrar zonas más húmedas y, por tanto, con menor resistividad eléctrica. Son

especialmente importantes en terrenos completamente expuestos a los rayos del Sol, debido a la sequedad del suelo.

Los electrodos pueden fabricarse con tubos o varillas de hierro galvanizado o bien con varillas *copperweld*.

Generalmente se utiliza el *copperweld*, que consiste en una varilla de hierro enfundada en una lámina de cobre. Este material combina las ventajas de la alta conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del hierro. Tiene buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica para ser clavado en el terreno y se puede conectar fácilmente a los cables de la red de tierra.

Como las cargas eléctricas tienden alojarse en la periferia se acostumbra instalar los electrodos en las esquinas de la red, y en especial en la zona próxima que rodea la instalación del equipo principal, transformadores, interruptores y pararrayos.

En el caso de subestaciones con poca superficie de terreno, como las de SF₆, se debe considerar la alta densidad de corriente, lo que ocasiona altos gradientes de tensión. Para evitar esto conviene observar las siguientes reglas:

- Aumentar de electrodos o su longitud.
- Instalar algunos electrodos remotos.
- Conectar la red de tierra a pequeñas redes de tierra, en zonas próximas.
- Perforar agujeros para introducir electrodos profundos.
- Aprovechar las tuberías de pozos profundos.
- Conectar la red a los hilos de guarda con bajadas en las torres próximas.

También se puede disminuir la resistencia del terreno de la subestación a través de un tratamiento químico, mediante cualquiera de las siguientes sustancias:

- Cloruro de sodio. No es recomendable por ser muy corrosivo, sobre todo para el hierro.
- Carbón o grafito en polvo. Son materiales inertes y de muy baja resistencia eléctrica.
- Bentonita. Este elemento es un barro formado por materiales volcánicos. No es corrosivo y tiene una resistividad de $2.5 [\Omega \cdot m]$. La baja resistividad resulta de un proceso electrolítico entre sus elementos, que son: agua, sodio, potasio, calcio y magnesio, los cuales al ionizarse abaten la resistividad del terreno. En áreas secas tiene la propiedad de autosellarse y no pierde agua.

Por ser muy higroscópico, absorbe el agua de las cercanías. Se acostumbra perforar un hoyo de $15 [cm]$ de diámetro, en donde se introduce el electrodo y se rellena con la bentonita.

Las cimentaciones de las estructuras de una subestación están normalmente humedecidas. El concreto es higroscópico y al enterrarse tiene una resistividad entre 25 y $40 [\Omega \cdot m]$. Cuando estas estructuras están construidas en terrenos de resistividad media o alta, puede ocurrir que las corrientes de tierra se deriven a través de las varillas coladas dentro del concreto.

Cuando fluye una corriente de falla por las varillas que cubre el concreto, se produce además de corrosión galvánica un aumento de volumen en la superficie de la varilla, del orden de unas dos veces, que a su vez provoca un incremento de la presión del acero sobre el concreto, rompiendo el concreto en las zonas aledañas.

3.2.3 Conectores

Son elementos que sirven para interconectar la red de tierra con los electrodos y con todas las estructuras eléctricas.

En los sistemas de tierra se utilizan conectores atornillados, de presión y soldados; los cuales deben soportar la corriente de la red de tierra en forma continua sin dañarse ni aumentar su resistencia a valores que impidan drenar la energía eléctrica.

3.2.3.1 Conectores atornillados

Se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que proporciona alta resistencia mecánica y a la corrosión (Fig. 5).

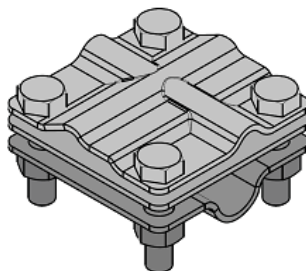


Figura 5. Conector atornillado, diseñado para el cruce de cables.

3.2.3.2 Conectores a presión

Se forman por una pieza hueca, en cuyos extremos se introducen las dos terminales del cable que se va a empalmar y mediante una prensa especial, con dados intercambiables según los calibres de los conductores, se produce la unión al comprimirse el material citado (Fig. 6).

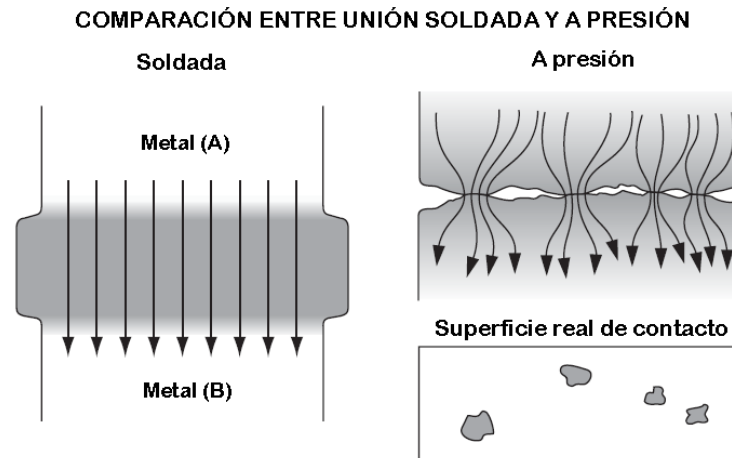


Figura 6. La unión a presión presenta una sustancial diferencia entre la aparente superficie de contacto y su superficie real.

3.2.3.3 Zapatas

Es otro tipo de conector, es una pieza metálica con un extremo plano que sirve para unir cables con estructuras. El lado plano de la zapata se une a la estructura por medio de un tornillo y el otro lado se une al cable ya sea a presión o soldado (Fig. 7).

CONEXIÓN DE ZAPATA

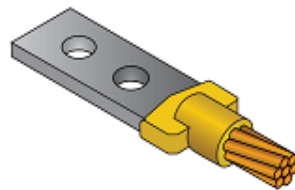


Figura 7. Zapata unida sólidamente al cabo de un cable de cobre.

3.2.3.4 Conectores soldados

Requieren de moldes de grafito de diferentes calibres en donde por medio de la combustión de cargas especiales, que producen temperaturas muy altas, se funden las puntas terminales que se van a soldar provocando una unión sólida de las dos piezas (Fig. 8).

DIFERENTES TIPOS DE UNIONES SOLDADAS

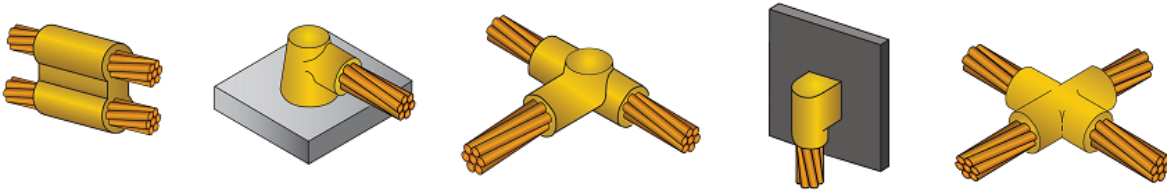


Figura 8. Existe gran variedad uniones, una para cada tipo de necesidad. Aquí sólo se muestran cinco de ellas.

3.2.4 Moldes de grafito

Son moldes especialmente diseñados y fabricados en grafito de alta calidad. Es en su interior donde ocurre la reacción exotérmica. Se compone básicamente de tres cámaras: una superior que almacena la soldadura en polvo, otra intermedia que permite el libre flujo de la soldadura fundida hacia abajo y por último una cámara que aloja los cables que serán unidos. La cámara inferior puede tener varias formas dependiendo del tipo de unión que se desea hacer y del calibre del cable de cobre con el que se trabaja. También existen moldes para unir cables a estructuras o a zapatas (Fig. 9).

VISTA INTERIOR DE UN MOLDE PARA SOLDAR



Figura 9. Molde de grafito, se aprecian todas sus cámaras interiores y los cables que serán unidos.

3.2.5 Soldadura

Es un polvo granular metálico que al activarse gracias a una fuente de ignición, eleva su temperatura a tal grado que se convierte en un material líquido. En su estado líquido desciende hasta los cables y los fusiona. Segundos después se solidifica y los cables quedan unidos firmemente en una sola pieza. Ocurre lo mismo cuando se une un cable a una estructura o a una zapata, el cable queda unido a éstas como si de una sola pieza se tratara.

3.2.6 Intensificador químico

Es un material súper conductor que resuelve los inconvenientes de la alta resistencia en el suelo. Mejora la eficacia de la puesta a tierra independientemente de las condiciones del suelo. Ideal para utilizar en áreas de baja conductividad como suelo arenoso o rocoso. Se utiliza ampliamente para rellenar los huecos que existen entre la varilla de puesta a tierra y la perforación donde se aloja ésta.

3.2.7 Pasta anticorrosión

Es un compuesto sellador y retardador de la corrosión galvánica en conexiones con diferentes metales. Asegura una alta conductividad entre los diferentes metales y no permite la formación de óxidos. Esta pasta comúnmente se aplica entre la zapata y la estructura ya que generalmente éstas son de diferentes metales y así se evita su unión directa y en consecuencia la corrosión galvánica.

3.3 Factores considerados en el diseño del Sistema de Tierra

3.3.1 Resistividad del terreno

La resistividad de un terreno se obtiene a partir de la fórmula que calcula la resistencia de un cubo de tierra de volumen unitario. La medición debe efectuarse en las peores condiciones posibles, es decir, en la época de secas haciendo mediciones en varios puntos de la subestación y hasta profundidades razonables que puedan permitir juzgar la homogeneidad y condiciones de humedad o nivel de aguas freáticas. También deben incluir datos sobre temperatura y condiciones de humedad en el momento de efectuarlas, tipo de terreno, profundidad de la medición y tipo de sales disueltas en el suelo.

La resistividad depende en gran medida del contenido de humedad, si ésta es escasa, la resistividad crece. De ser así, es necesario el uso de electrodos, lo suficientemente largos para llegar a capas de mayor humedad e instalar los conductores de la red a mayores profundidades.

La grava o roca triturada colocada en la superficie del terreno ayuda tanto a evitar la evaporación del agua como a reducir la magnitud de los choques eléctricos, dada su alta resistividad. La temperatura también afecta la resistividad del terreno. A menos de 0 [°C] la resistividad crece y a mayor temperatura decrece (Fig. 10).

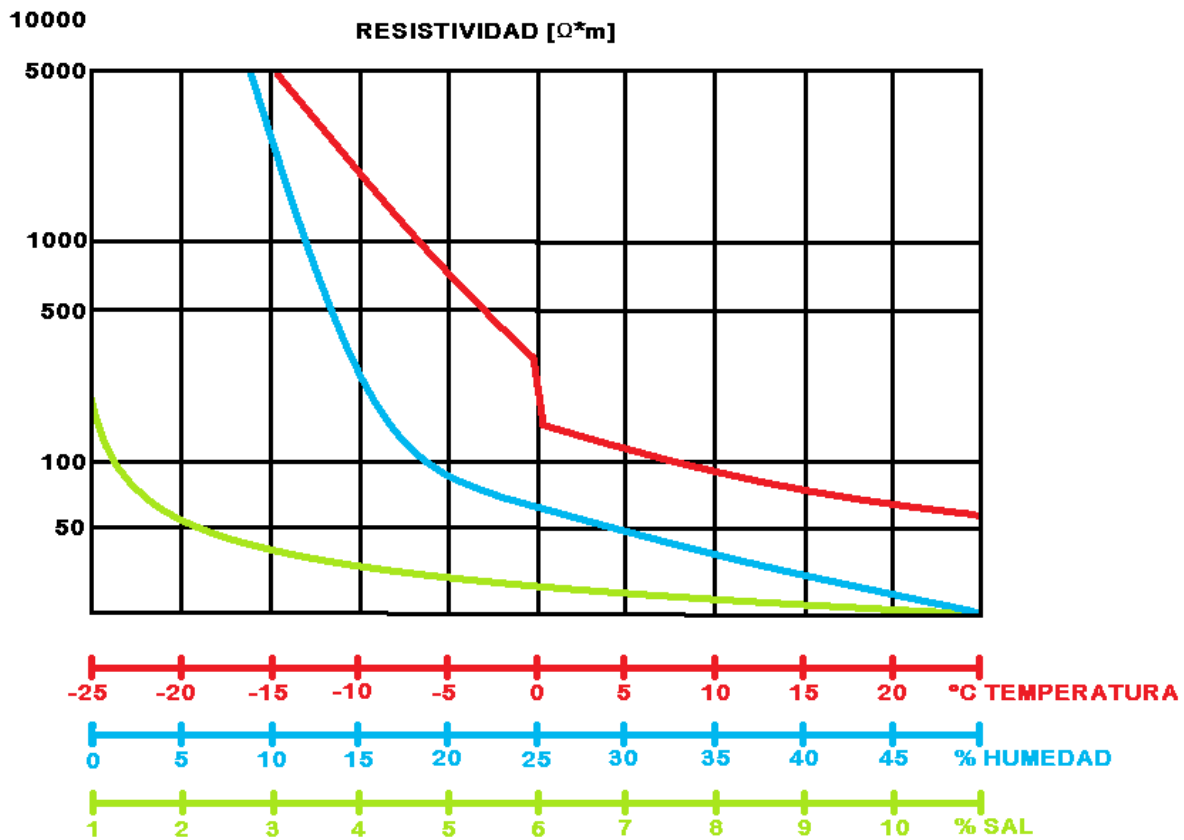


Figura 10. Gráfica que muestra la caída de resistividad con respecto a diferentes agentes ambientales, temperatura, humedad y salinidad (fuente: STD-80-2000-IEEE).

3.3.1.1 Medición de la resistividad

La resistividad de un terreno, se obtiene con el promedio de varias mediciones de un instrumento que posee cuatro electrodos. Los electrodos se clavan en la tierra separados igual distancia uno de otro a largo de una línea recta. El voltaje entre los dos electrodos interiores es medido y dividido por la corriente que inyectan los dos electrodos exteriores (Fig. 11).

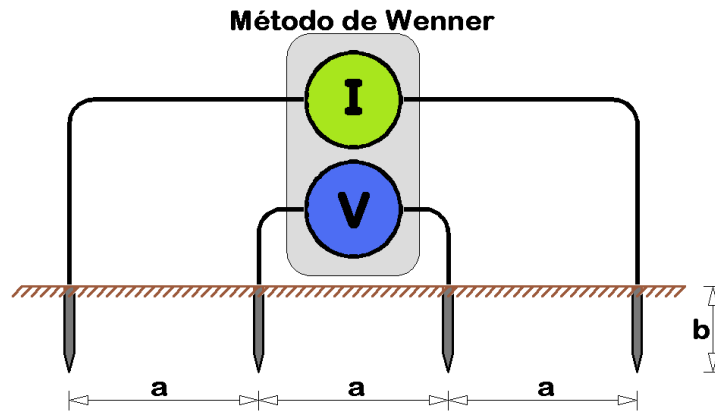


Figura 11. Método de *Wenner*, los electrodos se entierran a lo largo de una línea recta a una profundidad "b" y separados una distancia "a" (fuente: STD-80-2000-IEEE).

Si en los valores obtenidos las dos lecturas de resistividad más separadas varían menos de un 50%, se considera que la resistividad es uniforme y se utiliza el método llamado método de *Wenner* o de una capa. Si por el contrario los valores varían en más de un 50%, entonces se consideran dos resistividades diferentes, es decir, se utiliza el método de dos capas que lleva a un cálculo más complicado de la resistencia de la red de tierra, lo cual requiere calcular la resistividad de cada uno de los estratos, aunque en la actualidad los programas computacionales simplifican en gran manera los cálculos. Se acostumbra efectuar la medición de la resistividad tomando una profundidad constante pero, con separaciones variables de los electrodos.

3.3.2 Seguridad eléctrica en el sistema de tierra²

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debidas a disturbios atmosféricos o a fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro al personal que labora en el área.

Intensidades del orden de miles de amperes, producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto de contacto a tierra, y si además se da la circunstancia de que algún ser vivo se apoye en dos puntos entre los cuales exista una diferencia de potencial debida al gradiente arriba indicado, puede sufrir una descarga eléctrica que sobrepase el límite de su contractilidad muscular y provoque su caída. En tal situación la corriente que circula por el cuerpo aumenta, y si por desgracia ésta pasa por algún órgano vital como el corazón, puede originar

² Basado en Criteria of Tolerable Voltaje de la STD-80-2000-IEEE.

fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte. Los efectos más comunes de la corriente que circula a través del cuerpo humano dependen de la magnitud, duración y frecuencia de ésta.

Para diseñar un Sistema de Tierra segura para el personal se deben tomar en cuenta el valor de las siguientes tensiones.

3.3.2.1 Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde una persona está parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica aterrizada (Fig. 12).

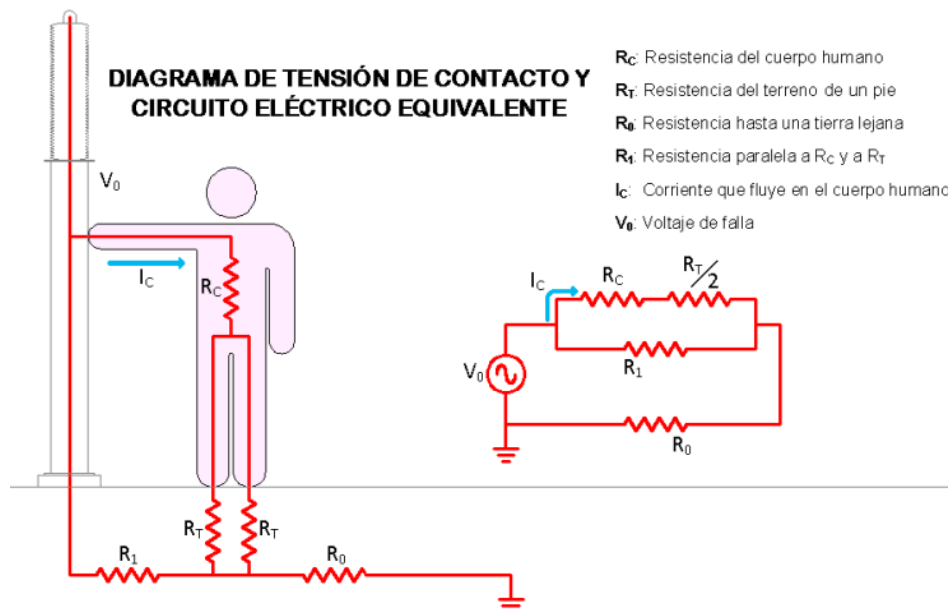


Figura 12. Diagrama que muestra la circulación de la corriente de contacto a través del cuerpo. A la derecha se encuentra el circuito equivalente (fuente: STD-80-2000-IEEE).

3.3.2.2 Tensión de paso

Es la diferencia del potencial superficial que puede experimentar una persona con los pies separados a 1 metro de distancia y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado (Fig. 13).

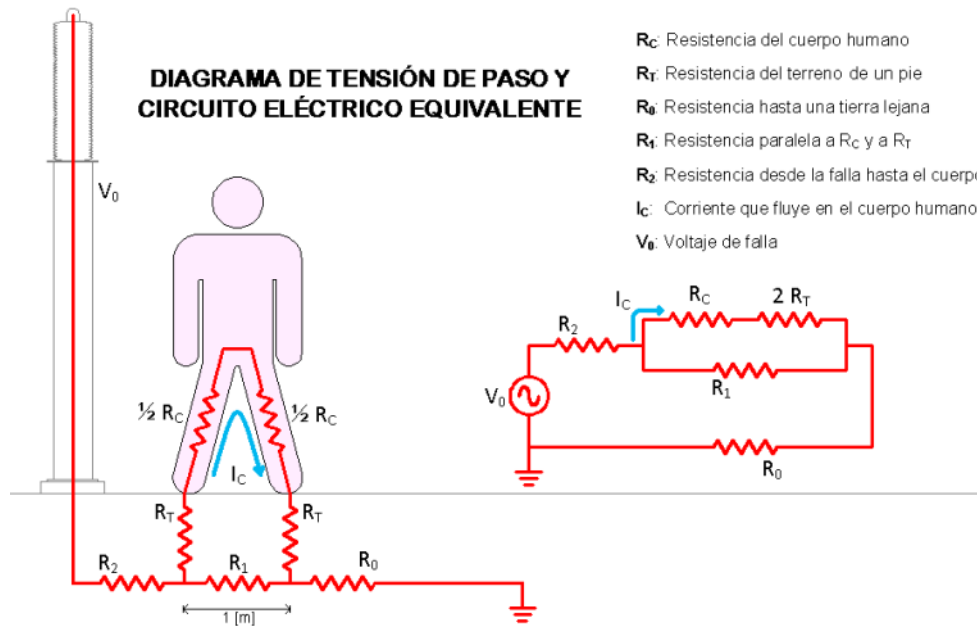


Figura 13. Diagrama que muestra la circulación de la corriente de paso a través de las piernas, las cuales tienen 1 [m] de separación entre sí. A la derecha se encuentra el circuito equivalente (fuente: STD-80-2000-IEEE).

3.3.2.3 Tensión de malla

Es la máxima tensión de contacto dentro de una malla en una rejilla para tierra.

3.3.2.4 Tensión transferida

Es un caso especial de tensión de contacto en donde una tensión es transferida hacia el interior o la parte de afuera de la subestación desde un punto externo remoto.

3.4 Efectos fisiológicos de la electricidad³

El cuerpo humano debe ser parte de un circuito eléctrico para que ocurra un efecto fisiológico adverso. La corriente debe entrar en el cuerpo humano por un punto y salir por otro. La magnitud de la corriente es igual al voltaje entre la suma de las impedancias de los tejidos del cuerpo y las dos interfaces en los puntos de entrada y salida del flujo eléctrico. Tres fenómenos pueden ocurrir cuando una corriente eléctrica fluye a través de tejidos biológicos:

- 1) estimulación eléctrica de los tejidos excitables (nervios y músculos)

³ Basado en Electrical Safety del libro de John G. Webster

- 2) calentamiento resistivo de los tejidos y
- 3) quemaduras electroquímicas y daño en los tejidos por el valor efectivo de la corriente y voltajes muy elevados.

Enseguida se muestran los efectos físicos y fisiológicos que ocurren en los humanos cuando la magnitud de corriente aplicada se incrementa progresivamente. La gráfica de la figura muestra el rango aproximado de corriente para producir cada efecto, cuando es aplicada en las manos húmedas de un ser humano de 70 [kg] una corriente de 60 [Hz] de 1 a 3 segundos con un cable de cobre de calibre 8 AWG (Fig.14). Enseguida se describen cada uno de estos efectos adversos.

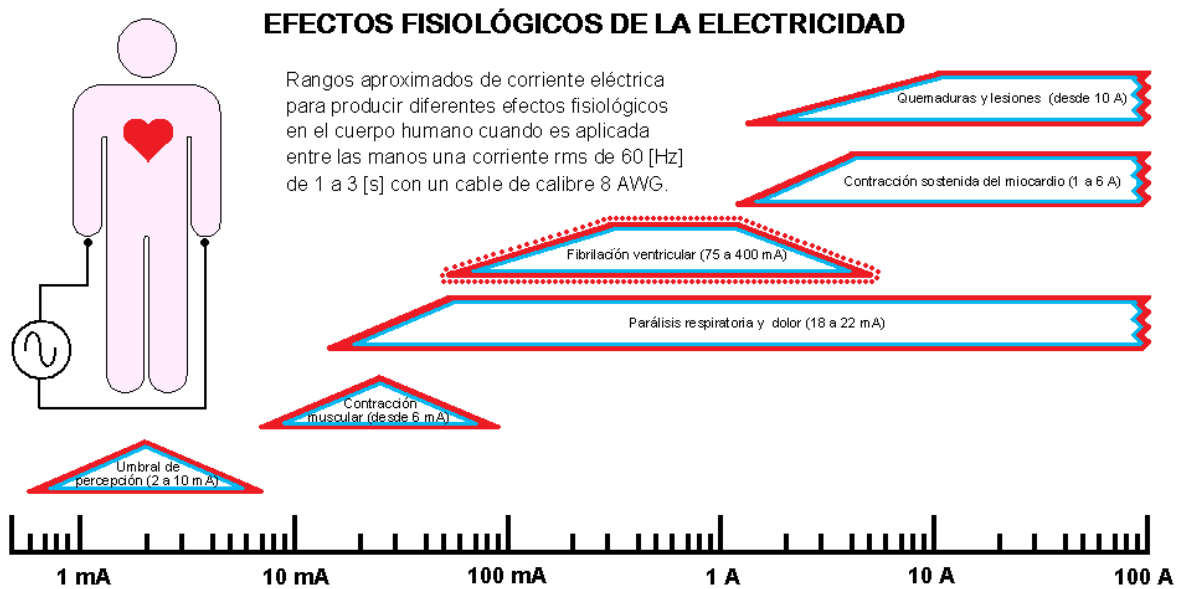


Figura 14. Gráfica que muestra los valores de corriente y sus correspondientes daños al cuerpo humano (fuente: H. Olson, Walter. Electrical Safety).

3.4.1 Umbral de percepción

Cuando la densidad de corriente es suficientemente grande para excitar las terminaciones nerviosas de la piel, el sujeto tiene una sensación de hormigueo. La corriente en el umbral de percepción es la mínima corriente que un individuo puede detectar. Este umbral varía considerablemente entre individuos. Cuando alguien con manos húmedas alcanza un delgado cable de cobre, el mínimo umbral es alrededor de 0.5 [mA] a 60 [Hz]. El rango del umbral para corriente directa es de 2 a 10 [mA], y se percibe un ligero calentamiento en la piel.

3.4.2 Contracción muscular

Para mayores niveles de corriente, los nervios y músculos son estimulados vigorosamente, y finalmente como resultados sobreviene dolor y fatiga. El sujeto experimenta contracciones involuntarias de los músculos o contracciones reflejas, debido a esto, el sujeto puede tener daños físicos secundarios, como caerse de una escalera. A medida que la corriente se incrementa aún más, las contracciones involuntarias de los músculos pueden impedir la separación voluntaria de su extremidad del objeto energizado. La corriente de contracción muscular es definida como la máxima corriente con la que un individuo puede retirarse voluntariamente del objeto energizado. El umbral mínimo para la corriente de contracción muscular es $6 [mA]$.

3.4.3 Parálisis respiratoria, dolor y fatiga

Corrientes aún mayores causan contracción involuntaria de los músculos respiratorios lo suficientemente graves como para provocar la asfixia si la corriente no es interrumpida. El paro respiratorio aparece de los 18 a los $22 [mA]$. Fuertes contracciones involuntarias de los músculos y estimulación involuntaria de los nervios pueden ser muy dolorosas y causar fatiga si la exposición es larga.

3.4.4 Fibrilación ventricular

El corazón es especialmente susceptible a las corrientes eléctricas de manera que éstas son particularmente peligrosas para él. Parte de la corriente que pasa a través del pecho fluye a través del corazón. Si la magnitud de la corriente es suficiente para excitar al menos parte del músculo cardíaco, entonces la propagación normal de la actividad eléctrica en el corazón es interrumpida. Si la actividad eléctrica cardíaca es lo suficientemente trastornada, el ritmo puede aumentar a 300 latidos por minuto. La acción de bombeo del corazón cesa y la muerte ocurre en algunos minutos.

Este rápido y desorganizado ritmo cardíaco es llamado fibrilación ventricular y, desafortunadamente la fibrilación no para cuando la corriente que la desencadenó es interrumpida. La fibrilación ventricular es la mayor causa de muertes debido a choques eléctricos. El umbral para la fibrilación ventricular para un humano de talla promedio varía entre los 75 y $400 [mA]$. La actividad rítmica normal regresa sólo si un breve pulso de alta corriente de un desfibrilador, es aplicado para despolarizar simultáneamente todas las células del músculo cardíaco. Después que todas las células se relajan juntas, usualmente el ritmo normal retorna.

3.4.5 Contracción sostenida del miocardio

Cuando la corriente es aún mayor, todo el músculo cardiaco se contrae. Aunque el ritmo cardiaco se detiene mientras la corriente es aplicada, el ritmo normal sobreviene cuando la corriente es interrumpida, como en una desfibrilación. El rango mínimo de corriente para la contracción sostenida del miocardio es de 1 a 6 [A]. El daño ocasionado en los tejidos del corazón es irreversible.

3.4.6 Quemaduras y lesiones físicas

Se conoce muy poco acerca de los efectos de las corrientes que exceden los 10 [A], particularmente para corrientes de corta duración. El calentamiento resistivo causa quemaduras, usualmente en los puntos de entrada y salida en la piel, porque la resistencia de la piel es muy alta. Voltajes mayores de 240 [V] pueden perforar la piel. El cerebro y otros tejidos nerviosos pierden toda la excitabilidad funcional cuando altas corrientes pasan a través de ellos. Además, las corrientes excesivas pueden estimular la contracción muscular lo suficientemente fuerte para arrancar los músculos de su unión con el hueso.

3.5 Variabilidad del umbral de percepción y de la contracción muscular

La siguiente figura muestra la variabilidad del umbral de percepción y de la contracción muscular para hombres y mujeres. En la gráfica se aprecian las líneas que se acercan a la distribución del umbral de percepción y de corriente de contracción muscular. Para los hombres el promedio del umbral de percepción es de 1.1 [mA]; para mujeres el promedio estimado es de 0.7 [mA]. El umbral mínimo de percepción es de 500 [μ A] (Fig. 15).

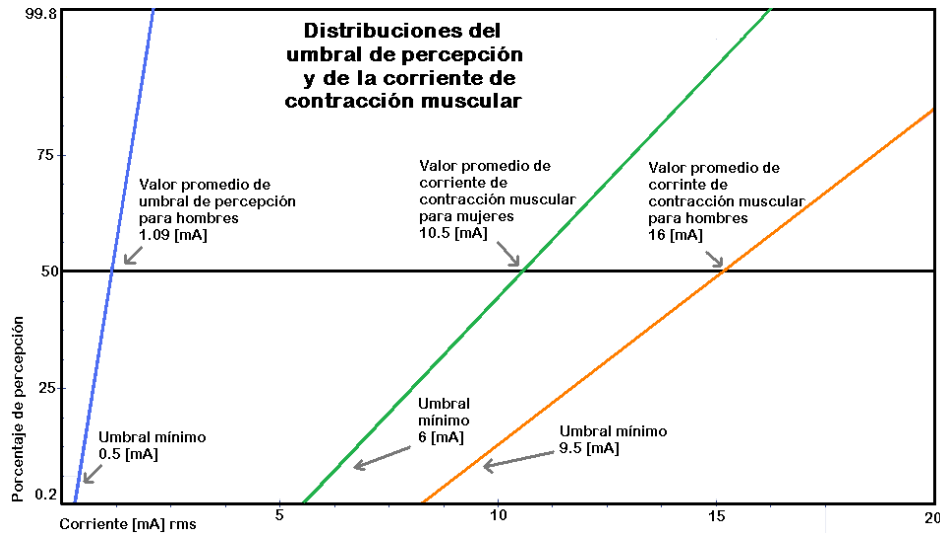


Figura 15. Gráfica que muestra el promedio del umbral de percepción y de la corriente de contracción muscular (fuente: H. Olson, Walter. Electrical Safety).

La corriente de contracción muscular tiene un promedio de $16 [mA]$ para hombres y $10.5 [mA]$ para mujeres. El mínimo umbral para la corriente de contracción muscular es $9.5 [mA]$ para hombres y $6 [mA]$ para mujeres. El rango de variabilidad de la corriente de contracción muscular es mucho mayor que el rango de corriente del umbral de percepción.

3.6 El factor de la frecuencia eléctrica

La siguiente figura muestra la gráfica de corriente de contracción muscular contra la frecuencia. Desafortunadamente, el valor mínimo de corriente de contracción muscular se tiene a frecuencias de 50 a $60 [Hz]$, que son las frecuencias comerciales de distribución de energía eléctrica. Para frecuencias por debajo de $10 [Hz]$, el valor de corriente de contracción muscular aumenta, probablemente porque los músculos pueden parcialmente relajarse durante parte de cada ciclo. Y a frecuencias por encima de algunos cientos de Hertz, la corriente de contracción muscular aumenta nuevamente (Fig. 16).

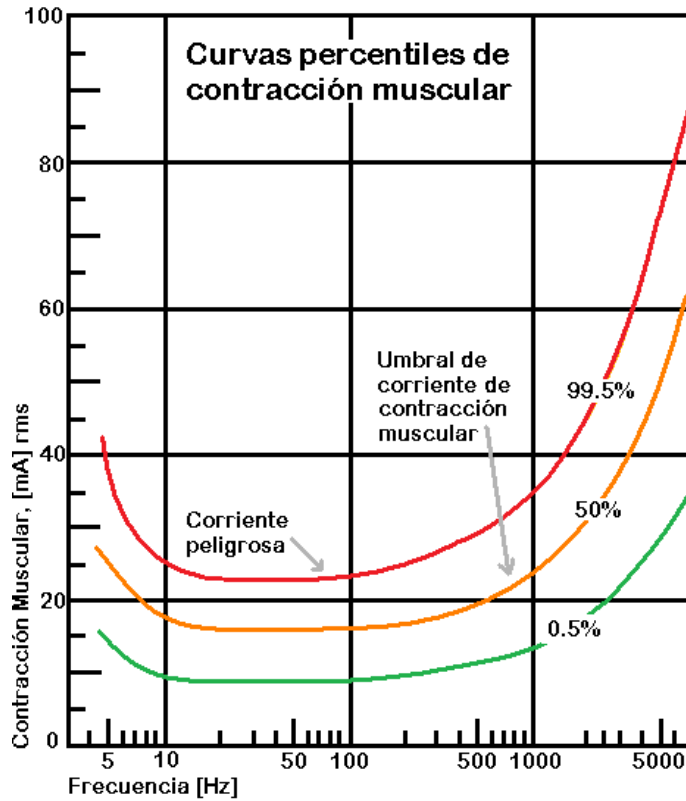


Figura 16. Gráfica que muestra los porcentajes del umbral de contracción muscular (fuente: H. Olson, Walter. Electrical Safety).

3.7 Puntos de entrada y salida de la corriente eléctrica

Cuando una corriente es aplicada entre dos puntos de la superficie del cuerpo, sólo una pequeña fracción del total de la corriente fluye a través del corazón. La magnitud de la corriente necesaria para hacer fibrilar el corazón es mucho mayor cuando la corriente es aplicada en la superficie del cuerpo. La protección de $15 [k\Omega]$ a $1 [M\Omega]$ que ofrece la piel, es eliminada si se traspasa su resistencia como cuando se tienen cortaduras o heridas. Además de que a menor masa muscular, ocurre mayor daño físico.

4 ANTECEDENTES DEL TEMA

Como parte del programa de mantenimiento preventivo de las instalaciones eléctricas del país, en febrero del 2011 se empezaron a llevar a cabo los trabajos de medición, evaluación, diagnóstico y rehabilitación de la red de tierra de 49 subestaciones eléctricas del área metropolitana de la Ciudad de México, con el objetivo de:

- Asegurar la confiabilidad eléctrica de las Subestaciones Eléctricas.
- Regular el voltaje, disminuyendo el índice de salidas de operación.
- Brindar seguridad al personal que actualmente labora en las subestaciones o está realizando actividades de rehabilitación.
- Proteger equipos como interruptores, apartarrayos, transformadores de corriente y de voltaje; ya que en caso de existir una falla a tierra por corto circuito o descarga atmosférica resultarían dañados, afectando la operación de las subestaciones y el suministro de energía eléctrica en el área metropolitana de la Ciudad de México.

Los trabajos correspondientes al mejoramiento de la red de tierra en las Subestaciones Eléctricas, tiene como objetivo principal: aumentar la confiabilidad eléctrica y asegurar la integridad física del personal y los equipos instalados ante condiciones anormales provocadas por fallas de corto circuito, apertura y cierre de interruptores o descargas atmosféricas dentro de las instalaciones.

Para lograr este objetivo se llevaron a cabo los siguientes trabajos, los cuales se dividieron en 2 etapas, medición y rehabilitación:

Medición, evaluación y diagnóstico.

- Inspección técnica en campo para verificar las condiciones de la Red de Tierra en cada subestación.
- Localización de la Malla de Tierra y verificación de sus conexiones mediante el uso de equipo de localización vía radiofrecuencia y la excavación del terreno por medios manuales.
- Medición de la resistividad del terreno.
- Medición de la resistencia de contacto.
- Realización de pruebas de integridad de la malla mediante inyección de corriente con el objetivo de evaluar potenciales de paso y contacto.
- Simulación digital de la red de tierra existente mediante el software *SKM Ground Mat* para determinar el comportamiento de la malla y poder hacer las propuestas de mejora correspondientes.
- Levantamiento arquitectónico de la subestación.

Rehabilitación y mantenimiento de la red de tierra de la subestación.

- Sustitución de las conexiones mecánicas o ponchables a conexiones soldables, con el objetivo de asegurar la continuidad de las mallas y reducir mantenimientos posteriores.
- A cada soldadura en estructura o zapata, aplicación de dos capas de un recubrimiento anticorrosivo y un acabado epóxico, con el objetivo de protegerla contra la oxidación y aumentar su tiempo de vida útil.
- En el caso de los equipos, instalación de zapatas soldables y sustitución de la tornillería. Con este trabajo se mejora la puesta a tierra de los equipos.
- Refuerzo de la malla de tierra cambiando los conductores dañados por cable nuevo. Dichos conductores fueron seleccionados según el nivel de corto circuito de cada subestación.
- Aterrizamiento de todas aquellas estructuras metálicas y equipo eléctrico que no cuente con puesta a tierra (transformadores de corriente y de voltaje, cuchillas, transformadores, apartarrayos, bancos de capacitores, etc).
- Interconexión entre los sistemas de tierra existentes con el fin de obtener un sistema equipotencial.
- Adecuación del sistema de tierra en cuartos de control y telecomunicaciones realizando los siguientes trabajos:
 - o Instalación de barras colectoras de puesta a tierra.
 - o Aterrizamiento de equipos eléctricos, control y telecomunicaciones.
 - o Instalación de un arreglo tipo (delta, anillo, etc.) para aterrizar las barras del cuarto de control, mediante cable de cobre desnudo unido a la red general de tierra.
 - o Perforación e instalación de electrodos profundos unidos a la red del cuarto de control.
 - o Instalación de protectores de línea contra transitorios de corriente y sobrevoltaje en el bus de 220 [V].
- Pruebas finales de la integridad de malla a las redes de tierra de cada subestación con el objetivo de verificar que los potenciales de paso y contacto no superen los límites permisibles o tolerables por el cuerpo humano.

5 CONTEXTO DE LA PARTICIPACIÓN PROFESIONAL

El Auxiliar Técnico tiene, entre otros, la función de supervisar los trabajos que enseguida se describen.

5.1 Dibujar el plano arquitectónico de la subestación.

El dibujo debe incluir toda el área de la subestación, indicar la localización exacta de cada una de sus estructuras como son: la entrada, el cuarto de control, los interruptores, y demás estructuras eléctricas.

5.2 Medir la resistividad del terreno.

La medición debe realizarse en un área que no tenga malla de tierra pues ésta puede generar mediciones erróneas. Se utiliza el método de *Wenner* o de cuatro puntos. Se necesita el aparato diseñado para tal propósito, el cual posee cuatro electrodos, dos de ellos de potencial y los otros dos de corriente.

5.3 Diseñar la red de tierra.

Con base en los valores de la resistividad del terreno, de la corriente de corto circuito y de los potenciales de paso, contacto y transferencia tolerables por el cuerpo humano, se diseña una red de tierra apropiada o la rehabilitación de la misma.

5.4 Cortar, romper, retirar concreto.

Para ubicar una malla de tierra existente o para instalar una nueva, se debe retirar en algunas zonas el concreto de la subestación ya que los cables se encuentran enterrados bajo el suelo.

5.5 Excavar tierra.

De igual manera que con el concreto, se debe extraer la tierra en cada cruce de la malla de tierra existente o hacer zanjas para instalar una nueva malla de tierra. Es importante que las zanjas tengan buena profundidad pues esto ayuda a que la energía eléctrica de una falla se drene con mayor facilidad.

5.6 Colocar los cables de la malla de tierra.

Si no existe una malla de tierra, entonces se debe instalar un anillo de tierra que abarque a todos los equipos eléctricos y a las zonas donde pueda presentarse un voltaje no deseado.

5.7 Soldar cada uno de los cruces de la malla de tierra.

Para rehabilitar la malla de tierra se deben retirar las conexiones en mal estado y reemplazarlas por otras nuevas. Si la malla de tierra es nueva, todo cruce de ésta debe soldarse para formar una rejilla con el cable de cobre.

5.8 Conectar toda estructura metálica a la malla de tierra.

Todas las estructuras metálicas que deban estar al potencial de tierra, deben ser unidas a la malla de tierra, por lo que debe soldarse un cable desde la malla de tierra hasta esta estructura, en los sitios donde no sea posible soldar, se debe colocar al cable una zapata y ésta unida mecánicamente a la estructura, sin olvidar la aplicación de la pasta anticorrosiva.

5.9 Pintar todas las uniones del exterior.

Todas las uniones deben protegerse de la corrosión con pintura epóxica y una segunda capa de pintura vinílica del mismo color que la que tiene la estructura.

5.10 Rellenar la excavación.

La malla de tierra debe ser cubierta en su totalidad con tierra, no dejando ningún hueco pues el cable de cobre necesita tener total contacto con la tierra de alrededor para que exista un eficiente drenado de la corriente de falla.

5.11 Reponer el concreto extraído.

El concreto debe ser repuesto para tener una subestación segura, de manera que se pueda transitar por ella sin obstáculo alguno, además de que el concreto representa un valor de resistencia muy alta en serie con el cuerpo humano.

5.12 Limpiar la zona de trabajo.

Se debe dejar las instalaciones limpias pues eso representa seguridad.

5.13 Escribir un informe final de los trabajos realizados.

Al final de los trabajos se debe escribir un informe que contenga detalladamente cada una de las tareas realizadas, con los cálculos que acreditan que la subestación es segura y además debe contener el plano donde se ubican las estructuras y la malla de tierra.

6 ANÁLISIS Y METODOLOGÍA EMPLEADA

El siguiente análisis está basado en el método de una capa del libro de Diseño de Redes de Tierra del Ing. José Raúl Martín.

Para saber si la red de tierra es segura, se debe calcular los potenciales de paso y de contacto de la subestación, y éstos deben ser menores a los tolerables por el cuerpo humano. En el apéndice 1 se realizan todos los cálculos con valores reales de una subestación eléctrica.

Como primer paso calculamos la tensión de paso y de contacto tolerable por el cuerpo humano.

La siguiente ecuación relaciona la energía absorbida J_C por el cuerpo humano cuando lo atraviesa una corriente I_C , durante un tiempo t .

$$J_C = (I_C)^2 * t$$

Despejando I_C , y sustituyendo la raíz de la energía por una literal de la siguiente manera $k = \sqrt{J_C}$ tenemos

$$I_C = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

La mayoría de las personas cuyo peso es de aproximadamente $70 [kg]$ puede soportar un valor de J_C igual $0.0246 [A^2*s]$ durante un lapso de tiempo de 0.3 a $3 [s]$. Así tenemos que $k_{70} = 0.157$ lo que da como resultado la siguiente ecuación

$$I_C = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \text{ para un cuerpo de } 70 [kg] \text{ de peso}$$

En la figura 13 podemos ver que la impedancia que tienen un par de pies con respecto al terreno para la tensión de paso es

$$Z_{paso} = 2 * R_T$$

Y de la figura 12 es evidente que para la tensión de contacto la impedancia que tienen un par de pies con respecto al terreno es

$$Z_{contacto} = \frac{R_T}{2}$$

Luego, para los fines del análisis eléctrico el pie humano es representado como un disco metálico despreciando la resistencia del cualquier tipo de calzado. La

resistencia de una disco metálico R_T [Ω] de radio b [m] en contacto con una superficie de terreno de resistividad ρ [$\Omega \cdot m$] homogénea es

$$R_T = \frac{\rho}{4 * b}$$

Si consideramos que este disco metálico tiene un radio de 0.08 [m], podemos sustituir y evaluar para obtener las impedancias aproximadas de paso y de contacto en función de la resistividad del terreno ρ [$\Omega \cdot m$].

$$Z_{paso} = 6 * \rho$$

$$Z_{contacto} = 1.5 * \rho$$

Para obtener el voltaje tolerable de paso y de contacto es necesario tomar en cuenta la resistencia del cuerpo humano, así obtenemos las siguientes ecuaciones

$$E_{paso} = I_C * (R_C + 6 * \rho)$$

$$E_{contacto} = I_C * (R_C + 1.5 * \rho)$$

Tomando un valor de 1000 [Ω] para la resistencia del cuerpo humano y sustituyendo el valor de la ecuación de I_C para una persona de 70 [kg], tenemos las siguientes ecuaciones

$$E_{paso_{\odot 1}} = \frac{157 + 0.9 * \rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_{contacto_{\odot 1}} = \frac{157 + 0.23 * \rho}{\sqrt{t}}$$

Una persona de aproximadamente 50 [kg] soporta un valor de J_C igual 0.0135 [$A^2 \cdot s$].

Es importante notar que la tensión tolerable por el cuerpo humano depende del valor de la resistividad del terreno donde se encuentre.

Una vez conocidos los valores de tensión de paso y de contacto tolerables por un ser humano, es necesario conocer los valores de tensión y de paso que genera la subestación para compararlos y saber si ésta es segura.

Para calcular la tensión de falla que alcanza una subestación se debe conocer la capacidad la corriente de corto circuito I [A], la resistividad ρ [$\Omega \cdot m$] del terreno, la profundidad h [m] de la red de tierra, y además el área A [m^2] de la subestación.

No es posible saber el tiempo t [s] que durará una falla por lo que este valor se supone.

Primero obtenemos el área de la de la red de tierra. La superficie que cubre la red de tierra se calcula

$$A = longitud * ancho$$

Esta área se refiere a la superficie que ocupan las estructuras y el equipo eléctrico de la subestación. Para simplificar los cálculos subsecuentes se toma el radio equivalente de la superficie A

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Para calcular la longitud del cable se deben tomar en cuenta los conductores transversales y los conductores longitudinales n .

La longitud total del cable será la siguiente

$$L = conductores\ transversales * ancho [m] + conductores\ longitudinales * longitud [m]$$

La corriente de cortocircuito máximo para el diseño de la red es

$$I'' = D_f * f_c * I$$

En la ecuación anterior se usan dos factores de corrección para la determinación de la corriente máxima de falla a tierra.

El factor de decremento D_f toma en cuenta el efecto del desplazamiento de la componente de corriente directa y la atenuación de las componentes transitorias de la máxima corriente de falla de alterna y directa, su ecuación es la siguiente.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{X''}{R} * \left(1 - e^{-\frac{2 * \omega * t}{X''}}\right)}$$

Tabulando para ciertos valores constantes de X''/R se obtiene la siguiente tabla.

Duración de falla	Ciclos	Factor de decremento D_f			
$t [s]$	$a 60 [Hz]$	$X''/R = 10$	$X''/R = 20$	$X''/R = 30$	$X''/R = 40$
1	60	1.013	1.026	1.039	1.052
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
0.5	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.4	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.3	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.2	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.1	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.05	3	1.232	1.345	1.462	1.515
0.00833	0.5	1.476	1.648	1.675	1.688

Tabla 1. Valores del factor de decremento a diferentes tiempos de falla (fuente: Raúl Martín, José. Diseño de Redes de Tierra).

También resulta prudente suponer un factor de crecimiento f_c de la subestación eléctrica, dando un margen adecuado que estime los valores futuros de las corrientes de falla, debido a un aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores, pues las modificaciones a la red de tierra resultan muy costosas.

La siguiente ecuación sirve para calcular la resistencia de la red de tierra R_1 , en un terreno con resistividad uniforme y una profundidad de la red h mayor a $0.25 [m]$, donde ρ es la resistividad del terreno, L es la longitud del cable de la malla de tierra y A es el área que ocupa la red de tierra

$$R_1 = \rho \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right)$$

También se toma en cuenta la corriente que se disipa en los hilos de guarda de cada torre.

Los hilos de guarda de las líneas aéreas desvían una porción de la corriente de falla, la cual ya no corre por el sistema de tierra de la subestación.

El radio equivalente de la superficie de cada torre es

$$r_T = \sqrt{\frac{\text{Área de la torre}}{\pi}}$$

Si consideramos que la resistividad debajo de las torres es uniforme, entonces la resistencia de cada torre R_T es

$$R_T = \frac{\rho}{2 * \pi * r_T}$$

Se considera un número de torres por kilómetro de línea y así la resistencia por cada kilómetro de línea es

$$R_{T_{km}} = \frac{R_T}{\text{número de torres por kilómetro}}$$

La impedancia equivalente es

$$Z_e = \sqrt{Z_1 * R_{T_{km}}}$$

Donde Z_1 es el valor de la impedancia del hilo de guarda.

La impedancia equivalente considerando los hilos de guarda es

$$Z_T = \frac{Z_e}{\text{número de hilos de guarda}}$$

Finalmente, la corriente I'' que llega a la subestación se reparte en forma inversamente proporcional a la resistencia de tierra R_1 , y a la resistencia de la red de hilos de guarda Z_T , o sea

$$I_{Z_T} = I'' * \frac{R_1}{R_1 + Z_T}$$

$$I_{R_1} = I'' * \frac{Z_T}{R_1 + Z_T}$$

Cada uno de los elementos del Sistema de Tierra debe soportar la corriente de falla máxima, durante un tiempo establecido sin llegar a la fusión. Estos elementos son los cables de cobre de la malla, las conexiones y las zapatas entre otros.

Para calcular el área transversal mínima que necesita el conductor de la red de tierra para evitar su fusión se tiene la siguiente ecuación.

$$A = I * \sqrt{\frac{35 * t}{\log_{10} \left(\frac{T_{max} - T_{amb}}{234 + T_{amb}} + 1 \right)}}$$

En la tabla se muestran los valores de la sección de cable de cobre necesaria para prevenir la fusión a partir del tiempo de falla

<i>Sección de cable de cobre por Amper para evitar la fusión</i>			
<i>Tiempo de falla</i>	<i>Cable solo</i>	<i>Unión de soldadura de latón</i>	<i>Con conectores</i>
<i>[s]</i>	<i>[c mil/ A]</i>	<i>[c mil/ A]</i>	<i>[c mil/ A]</i>
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

Tabla 2. Valores del calibre de cable de cobre para la instalación de la red de tierra (fuente: Raúll Martín, José. Diseño de Redes de Tierra).

Para conocer el calibre necesario para el diseño de la red de tierra se multiplica el valor obtenido en la tabla y la corriente de falla

$$a_1 = \text{Sección mínima} * I_{R_1}$$

Considerando el caso más desfavorable, sin hilos de guarda, el área del conductor es

$$a_2 = \text{Sección mínima} * I''$$

Por norma y debido a cuestiones mecánicas se debe utilizar como mínimo un calibre de cable de 4/0 AWG.

<i>Equivalencia entre calibres para cable de cobre</i>						
<i>Calibre</i>	<i>Calibre</i>	<i>Diámetro</i>		<i>Calibre</i>	<i>Calibre</i>	<i>Diámetro</i>
<i>[c mils]</i>	<i>[AWG]</i>	<i>[mm]</i>		<i>[c mils]</i>	<i>[AWG]</i>	<i>[mm]</i>
1021	20	0.812		105518	1/0	8.25
1288	19	0.912		133056	2/0	9.27
1624	18	1.02		167780	3/0	10.4
2048	17	1.15		211566	4/0	11.68
2582	16	1.29		250000	4.7/0	12.7
3256	15	1.45		300000	5.5/0	13.91
4106	14	1.63		350000	6.2/0	15.03
5178	13	1.83		400000	6.7/0	16.06
6529	12	2.05		450000	7.3/0	17.04
8233	11	2.3		500000	7.7/0	17.96
10382	10	2.59		600000	8.5/0	19.67
13091	9	2.91		700000	9.2/0	21.25
16507	8	3.26		750000	9.5/0	22
20815	7	3.66		800000	9.7/0	22.72
26248	6	4.12		900000	10.2/0	24.1
33098	5	4.62		1000000	10.7/0	25.4
41735	4	5.19		1250000	11.7/0	28.4
52627	3	5.83		1500000	12.4/0	31.11
66361	2	6.54		1750000	13.1/0	33.6
83680	1	7.35		2000000	13.7/0	35.92

Tabla 3. Equivalencias de calibres para cable de cobre en varias unidades de medida (fuente: Grupo ConduMex. Manual técnico de instalaciones eléctricas en baja tensión).

La elevación de tensión de la red de tierra es

$$E_1 = I_{R_1} * R_1$$

Si no se consideran los hilos de guarda, la tensión será la siguiente

$$E_2 = I'' * R_1$$

El potencial de malla representa el máximo voltaje de contacto en un enrejado de una red de tierra.

Para calcular el potencial de malla primero se deben conocer dos coeficientes, K_m y K_i

El coeficiente que representa el dimensionamiento de la malla K_m , toma en cuenta el número de conductores paralelos n , el espaciamiento D , el diámetro d , y la profundidad de enterramiento h , de los conductores que forman la red y se calcula como sigue

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} * \ln\left(\frac{D^2}{16 * h * d}\right) + \frac{1}{\pi} * \ln\left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \dots\right)$$

El número de factores del segundo término es igual al número de conductores longitudinales menos dos.

El factor de irregularidad K_i , que toma en cuenta el flujo de corriente no uniforme en la red se calcula como sigue

$$K_i = 0.65 + 0.172 * n$$

Ya que tenemos los valores K_m y K_i el potencial de malla se obtiene de la siguiente manera

$$E_{malla_1} = K_m * K_i * \rho * \frac{I_{R1}}{L}$$

Sin considerar los hilos de guarda, el potencial de malla es el siguiente

$$E_{malla_2} = K_m * K_i * \rho * \frac{I''}{L}$$

Para calcular el potencial de paso primero se debe conocer el factor geométrico K_s , el número de los términos dentro del paréntesis es igual al número de conductores transversales de la malla pero, se pueden considerar solamente los primeros cinco sin perder exactitud en el valor.

$$K_s = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{2 * D} + \frac{1}{3 * D} + \frac{1}{4 * D} \right)$$

En seguida se calcula el potencial de paso en el perímetro de la malla, que es donde se presentan los valores más altos de voltaje.

$$E_{paso_1} = K_s * K_i * \rho * I_{R_1} * \frac{1}{L}$$

Sin considerar los hilos de guarda, el potencial de paso será el siguiente

$$E_{paso_2} = K_s * K_i * \rho * I'' * \frac{1}{L}$$

Una vez que tenemos los resultados de los cálculos, se compara la tensión de paso. La tensión de paso tolerable por el cuerpo humano debe ser mayor que la calculada en la Subestación Eléctrica, en caso contrario, la S. E. es insegura.

$$¿ E_{paso_2} < E_{paso_{\odot_1}} ?$$

También se compara la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano con el potencial que se tiene en la Subestación Eléctrica.

$$¿ E_{malla_2} < E_{contacto_{\odot_1}} ?$$

La tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano debe ser mayor que la de la Subestación Eléctrica, en caso contrario, la S. E. es insegura.

Generalmente en las Subestaciones existe una plancha, ya sea de grava o de concreto, que sirve para aumentar la resistencia en serie con el cuerpo humano.

Para calcular la tensión existente (para una persona de 70 [kg]) en una subestación eléctrica con una plancha de un material aislante se tiene

$$E_{paso_{\odot_2}} = \frac{157 + 0.9 * \rho_{suelo}}{\sqrt{t}}$$

$$E_{contacto_{\odot_2}} = \frac{157 + 0.23 * \rho_{suelo}}{\sqrt{t}}$$

Con esos nuevos valores se vuelven a hacer las comparaciones, ahora con la situación favorable, en la que parte de la energía se drena por los cables de las torres.

$$¿ E_{paso_1} < E_{paso_{\oplus 2}} ?$$

$$¿ E_{malla_1} < E_{contacto_{\oplus 2}} ?$$

Si las tensiones de paso y de contacto tolerables por el cuerpo humano son mayores que las que existen en la Subestación Eléctrica, se tiene la certeza que ésta es segura.

7 PARTICIPACIÓN PROFESIONAL

En este apartado describo todas las tareas que realicé como Auxiliar Técnico para la Comisión Federal de Electricidad en el proyecto de Rehabilitación del Sistema de Tierra en las Subestaciones Eléctricas del área metropolitana. Más adelante, en el apéndice 2 describo con más detalle y más imágenes cada una de las labores que se deben realizar para rehabilitar el sistema de tierra.

Para tener una visión integral de los trabajos que se deben llevar a cabo es necesario tener un plano general de la subestación eléctrica. Por esta razón dibujé el plano arquitectónico de la subestación, incluyendo toda el área de la misma e indicando la localización exacta de cada una de sus estructuras como son: la entrada, el cuarto de control, los interruptores, y demás estructuras eléctricas. Y a medida que los trabajos avanzaban y se iba descubriendo la malla de tierra, dibujé también la disposición exacta de los cables enterrados (Fig. 17).

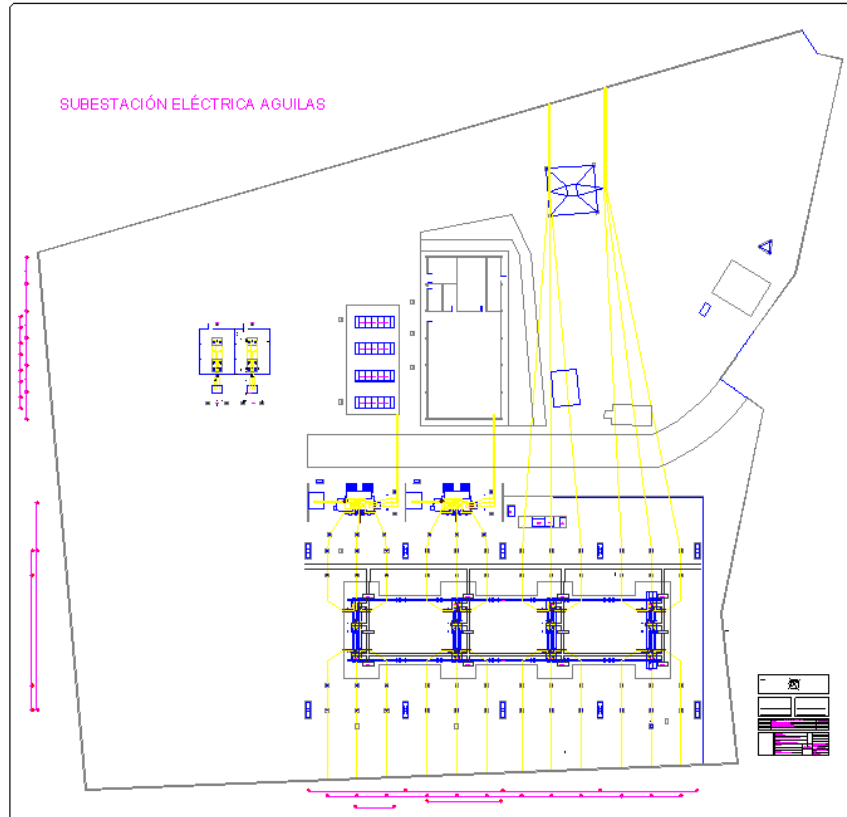


Figura 17. Plano arquitectónico de una subestación eléctrica del área metropolitana. Casi toda el área es terreno rústico, la parte inferior muestra el área de 230 [kV] y en medio dos transformadores de 230/23 [kV].

La malla de tierra se encuentra enterrada y los equipos eléctricos se ubican algunos metros por encima del suelo hasta donde debe llegar el cable de cobre para aterrizarlos. Por esta razón conviene crear objetos virtuales tridimensionales y así poseer una mejor perspectiva del área de trabajo.

Es necesario conocer la homogeneidad del terreno de la subestación, para así calcular y diseñar una red de tierra adecuada, que brinde seguridad al personal que allí labora, por lo que una cuadrilla especial (en la que no participé) midió la resistividad del terreno cuidando que fuera en un área que no tuviera malla de tierra pues ésta puede generar mediciones erróneas. Se utilizó el método de *Wenner* o de cuatro puntos. Se necesitó el aparato diseñado para tal propósito, el cual posee cuatro electrodos, dos de ellos de potencial y los otros dos de corriente.

Ayudé a planificar la rehabilitación de la red de tierra, con base en los valores de la resistividad del terreno, de la corriente de corto circuito y de los potenciales de paso, contacto y transferencia tolerables por el cuerpo humano.

Generalmente las subestaciones eléctricas poseen una plancha de concreto o de grava para aumentar la resistencia eléctrica en serie con cuerpo humano. Esta plancha cubre la red de tierra por lo que debe ser retirada, pero al finalizar los trabajos, ésta debe ser repuesta pues brinda seguridad evitando la circulación de corriente eléctrica a través del cuerpo humano en caso de una falla. Supervisé los trabajos de corte, rompimiento y retiro del concreto. También inspeccioné las labores excavación de tierra para ubicar una malla de tierra existente (Foto 1).



Fotografía 1. Rompimiento del concreto con ayuda de un rotomartillo eléctrico.

Debe existir malla de tierra en toda la subestación eléctrica o al menos alrededor de todos y cada uno de los aparatos eléctricos, esto con la finalidad de que el camino de una corriente de falla hacia la tierra sea lo más corto posible. Por esta razón en los sitios donde no existía o no se encontró malla de tierra mandé instalar una malla de tierra que abarcara a todos los equipos eléctricos y a las zonas donde pudiera presentarse un voltaje no deseado (Foto 2).



Fotografía 2. Tendido de cable de cobre nuevo.

Para aumentar la longitud del conductor de la red de tierra en lugares pequeños o en terrenos secos y, en consecuencia, con mayor resistividad, se utilizan los

electrodos de tierra. Los electrodos son varillas de cobre con alma de hierro, tienen una longitud de tres metros pero, pueden cortarse para adaptarlos a una menor profundidad en el terreno.

Debido a que en su mayor parte, el electrodo es de hierro, debe soldarse a él de manera paralela un cable de cobre, que es el que realmente conduce la corriente de falla, de esta manera el electrodo sólo tiene la función de brindar rigidez mecánica a este cable. Previamente debe perforarse un agujero por donde será introducido el electrodo junto con el cable y el cabo del cable debe unirse a la red de tierra. Para rellenar los huecos entre el electrodo y la tierra de alrededor, se usa una mezcla de agua e intensificador químico que rebose todos los recovecos y es un material de muy baja resistencia eléctrica (Foto 3).



Fotografía 3. Perforación para alojar electrodo de tierra.

Como es primordial proteger los transformadores de potencia, decidimos colocar al menos un electrodo en las cercanías de cada uno, de esta manera cualquier falla eléctrica se drena de manera más eficaz pues, la red de tierra alcanza una mayor profundidad lo que se traduce en mayor humedad y por lo tanto menor resistencia entre el cable de la red de tierra y sus alrededores (Foto 4).



Fotografía 4. Instalación del electrodo cerca del transformador a proteger.

Es de vital importancia evitar gradientes de potencial en cualquier sitio de la subestación por lo que todas las estructuras metálicas deben estar interconectadas a través de la malla de tierra, además todos los cruces de los cables transversales y longitudinales de la malla de tierra deben soldarse para obtener una superficie equipotencial. Por lo anterior, vigilé que se soldaran cada uno de los cruces de la malla de tierra (Foto 5).



Fotografía 5. Unión de todos los cruces de la malla.

Encontramos que todos los cruces de la malla de tierra ya estaban unidos con conectores de latón, pero con el paso de tiempo y debido a la corrosión galvánica entre el conector y el cable de cobre existía una capa de óxido que impide el paso de la corriente ya que esta oxidación genera una gran resistencia eléctrica (Foto 6).



Fotografía 6. Conector de latón.

Para rehabilitar la malla de tierra se deben retirar las conexiones en mal estado y reemplazarlas por otras nuevas. Por lo dicho en el párrafo anterior, ordené que en toda la subestación se retiraran todas las conexiones antiguas y fueran reemplazadas por uniones soldadas.

Las uniones soldadas tienen la ventaja de no generar corrosión galvánica pues los metales quedan fusionados en una sola pieza y así cables transversales y longitudinales quedan unidos en una sola pieza equipotencial.

Reiterando la necesidad de que todas las estructuras metálicas quedaran firmemente unidas a la malla de tierra para así poder evitar los gradientes de potencial en el caso de una falla, ya sea ésta por operación de interruptores o por descarga atmosférica; mandé que todas las estructuras metálicas que deban estar al potencial de tierra, fueran unidas a la malla de tierra. Para estos trabajos revisé que se soldara un cable desde la malla de tierra hasta la base de las estructuras (Foto 7).



Fotografía 7. Instalación de zapata para aterrizar la base de un apartarrayo.

La temperatura, la humedad, la presión, entre otros cambios climáticos así como las vibraciones propias del terreno, ocasionan que las zapatas de conexión se aflojen y

exista corrosión galvánica en su unión con la estructura que aterrizan, lo que ocasiona alta resistencia eléctrica por dos razones, la primera es la separación de la zapata a la pared de la estructura y la segunda por el óxido que se forma entre las paredes de la zapata y la estructura. Por lo que se prefiere que el cable que aterriza a la estructura sea unido soldándolo a ésta, así se evitan esos inconvenientes (Foto 8).



Fotografía 8. Soldando el cable de tierra directamente a la estructura.

Para soldar un cable de tierra, se utilizan moldes de grafito que soportan altas temperaturas. El interior del molde cambia dependiendo del tipo de soldadura que se va a realizar, pero tienen características similares, como que todos necesitan orificios por donde se meta el cable a soldar y en la parte superior una cámara que aloja la soldadura en polvo. Con la ayuda de pólvora se calienta la soldadura en polvo, licuándose y escurriendo en estado líquido a una cámara inferior donde se alojan los cables a ser soldados (Foto 9).



Fotografía 9. Molde para soldar, se pueden ver la tapa y las cámaras interiores.

En el caso de la unión del cable a la estructura metálica, los moldes deben empalmarse firmemente a una cara plana de la estructura, desafortunadamente en algunos casos es imposible realizar esta labor ya sea por la falta de espacio para colocar los moldes o porque no existe cara plana en dicha estructura o simplemente porque la cara metálica es demasiado delgada y las altas temperaturas generadas podrían fundirla y derramar todo el metal líquido. Sólo en estos casos se recurre al uso de zapatas (Foto 10).



Fotografía 10. En áreas donde no se puede soldar directamente, es imprescindible el uso de zapatas.

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes entran contacto directo y están en presencia de un electrolito. Como es el caso de zapatas de aluminio o cobre instaladas a las estructuras de hierro en la intemperie. Para evitar los factores ambientales y así mismo la corrosión galvánica, ordené y supervisé que se impregnaran las superficies en contacto con una pasta anticorrosiva que tiene la cualidad de no permitir la entrada del electrolito. Además mandé pintar todas las uniones del exterior para protegerlas de la corrosión, oxidación y aumentar el tiempo de su vida útil (Foto 11).



Fotografía 11. Pintura aplicada a la unión del cable y la estructura.

Supervisé el relleno de la excavación pues, la malla de tierra debe ser cubierta en su totalidad con tierra, no dejando ningún hueco, además de que la tierra debe ser compactada para que así el cable de cobre tenga el máximo contacto con la tierra de alrededor y poder drenar toda la corriente de falla hacia un cuerpo neutro como lo es la Tierra misma (Foto 12).



Fotografía 12. Relleno de zanja que aloja el cable del anillo de tierra.

Como ya se mencionó, el concreto debe ser repuesto para tener una subestación segura, mandé que éste fuera repuesto de manera que se pudiera transitar por ella sin obstáculo alguno. Además de que el concreto representa un valor de resistencia eléctrica muy alta, también ayuda a que la humedad de la tierra no se evapore y así se drene más rápido la corriente eléctrica en caso de falla (Foto 13).



Fotografía 13. Reposición del concreto.

Una vez acabados los trabajos de la Rehabilitación de la Red de Tierra, ordené limpiar la zona de trabajo y vigilé que se dejaran todas las instalaciones limpias tal

como las encontramos en nuestra llegada. Una zona de trabajo limpia ofrece seguridad al personal que allí labora (Foto 14).



Fotografía 14. Área de trabajo limpia al finalizar las labores.

La seguridad es prioridad ante todo. Cabe destacar que durante todo el proyecto supervisé que todos los trabajadores portaran su equipo de seguridad, como uniforme manga larga de algodón, casco, guantes, botas y lentes. El equipo de seguridad ayuda a amortiguar golpes de herramienta, aislar del calor de los moldes para soldar y la limadura de hierro, pero como el trabajo se realiza muy cerca de líneas de alta tensión, el equipo de protección sirve principalmente como una barrera aumentando la resistencia en serie del cuerpo humano e impedir el flujo excesivo de corriente eléctrica a través de éste, ayudando a evitar así un lamentable accidente (Foto 15).



Fotografía 15. Trabajadores portando el equipo de seguridad al realizar sus tareas.

Durante todos los trabajos tomé fotografías con el objetivo de tener una memoria fotográfica de los trabajos y poder anexarlas a un informe. Este informe contiene detalladamente cada uno de los trabajos realizados, con los cálculos que acreditan que la subestación es segura y contiene también el plano donde se ubican las estructuras, la malla de tierra y el lugar exacto de todas las uniones de malla y de los cables que aterrizan todas y cada una de las estructuras.

8 RESULTADOS Y APORTACIONES

Durante los trabajos correspondientes a la rehabilitación de la red de tierra de la subestaciones eléctricas se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Aplicación de soldaduras exotérmicas.
- Se instalaron zapatas soldables a los equipos.
- Para localizar y soldar la malla se excavó y rellenó por medios manuales la tierra.
- Se tendió cable de cobre desnudo para aterrizar estructuras, instalar mallas nuevas y completar las existentes.
- Se demolió y repuso el concreto.

Los resultados obtenidos de la rehabilitación son los siguientes:

- Cuando se realizaron las pruebas de integridad de la malla, antes de rehabilitar, el 73% de la corriente se drenaba directamente a la malla, una vez rehabilitado el sistema de tierra, el 83% de la corriente se drena adecuadamente a la red general de tierras, lo cual representa una mejora significativa en la confiabilidad y seguridad del sistema.
- Durante la excavación se determinó la topología de la red de tierras existente en cada subestación rehabilitada, lo que permite tener el plano de la red general de tierras actualizado.

Con la mejora del sistema de tierra se obtienen los siguientes beneficios:

- Se proporciona un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, ya sean debidas a una falla a tierra del sistema o a la operación de apartarrayos.
- Evitar que durante la circulación de corrientes de falla a tierra se originen diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación que puedan

- ser peligrosas para el personal, considerando que las tensiones tolerables por el cuerpo humano sean mayores que las tensiones resultantes en la malla.
- Facilitar la operación de los dispositivos de protección adecuados para la eliminación de las fallas a tierra.
 - Proveer una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran.
 - Al rehabilitar las redes de tierra y el aterrizamiento de los equipos dentro del cuarto de control principal de cada subestación, se protege la operación y monitoreo de la subestación ante incidencias producto de fallas o descargas atmosféricas.
 - La instalación, calidad de materiales, resultados y diseños cumplen con lo establecido en la norma de referencia NRF-011-CFE-2004, Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas y con la NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas.
 - Los niveles de potencial de paso y contacto en la subestación no supera los niveles tolerables por el cuerpo humano. En las simulaciones (que aquí no se muestran) podría observarse 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.

9 CONCLUSIONES

En mi trabajo en las Subestaciones Eléctricas del área metropolitana de la Ciudad de México, llevé a cabo la supervisión de las tareas de medición, evaluación, diagnóstico y rehabilitación de la red de tierra de 4 subestaciones eléctricas. En éstas subestaciones realicé las siguientes labores:

- Inspeccioné las condiciones de la red de tierra de cada subestación.
- Localicé la malla de tierra y verifiqué sus conexiones después de la excavación que realizaron los trabajadores.
- Supervisé las pruebas de integridad de la malla mediante inyección de corriente con el objetivo de evaluar potenciales de paso y contacto.
- Una vez realizada la evaluación de campo procedí a realizar la simulación digital de la red de tierra existente mediante el software *SKM Ground Mat* para determinar el comportamiento de la malla y poder hacer las propuestas de mejora correspondientes.
- Llevé a cabo el levantamiento arquitectónico de la subestación.

Gracias a estas labores, las subestaciones, son ahora más seguras para todo el personal que trabaja dentro de sus instalaciones.

En mi trabajo se reafirmaron todos los conocimientos teóricos que recibí en la UNAM. En cada subestación surgieron problemas que resolví técnicamente con conocimientos de ingeniería. En este período he constatado que toda la educación que me dio la UNAM me ha sido de mucha utilidad para desempeñar mi trabajo como un buen ingeniero.

APÉNDICE 1

Memoria de cálculo de la red de tierra⁴

Enseguida se muestran los cálculos básicos de la red de tierra de una Subestación Eléctrica del área metropolitana de la Ciudad de México, cuyo voltaje en el lado de alta tensión es de $230 [kV]$ y en el de baja de $23 [kV]$ y una capacidad de $180 [MVA]$.

Los trabajos en la Subestación incluyeron la instalación de electrodos pero, no serán tomados en cuenta porque fueron distribuidos de manera no uniforme, lo que complica en gran medida los cálculos.

La resistividad que se midió en el terreno es $\rho = 25 [\Omega \cdot m]^5$, la profundidad de la red de tierra existente es $h = 0.4 [m]$, el área de la Subestación es mayor pero, donde se encuentran las estructuras y el equipo eléctrico tiene una *longitud* = $87.4 [m]$ y un *ancho* = $59.8 [m]$.

Para los cálculos se supondrá un tiempo de duración de falla de $t = 0.5 [s]$, o sea, 30 ciclos, aunque las protecciones actuales libran una falla en menos de un ciclo.

La superficie que cubre la red de tierra es

$$A = \textit{longitud} * \textit{ancho}$$

$$A = 87.4 [m] * 59.8 [m] = 5226.52 [m^2]$$

El radio equivalente de la superficie A

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$r = \sqrt{\frac{5226.52 [m^2]}{3.1416}} = 40.7879 [m]$$

⁴ Cálculos y ecuaciones basadas en Diseño de Redes de Tierra del libro del Ing. José Raúl Martín.

⁵ Dato proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad.

Como puede verse en la Figura 18, existen 20 conductores transversales, espaciados 4 [m].

Y hay además 17 conductores longitudinales, $n = 17$, espaciados 4 [m].

Generalmente la longitud total de la red de tierra es calculada sumando el tendido del cable más los electrodos enterrados pero, por tratarse de cálculos básicos, aquí no serán tomados en cuenta estos últimos, por lo que tenemos

$$L = 20 * 59.8 [m] + 17 * 87.4 [m] = 2681.8 [m]$$

La corriente de cortocircuito máximo para el diseño de la red es

$$I'' = D_f * f_c * I$$

Revisando los valores de la Tabla 1, como la falla es de 0.5 [s] entonces $D_f = 1.052$

Se supone un factor de crecimiento del veinte por ciento, $f_c = 1.2$, debido a que todos los alrededores de la subestación ya están poblados y además se tiene una política nacional de ahorro de energía.

Y en la Subestación existe un valor de corriente de falla de una fase a tierra de 28394 [A]⁶ en el lado de baja tensión.

$$I'' = 1.052 * 1.2 * 28394[A] = 35844.5856 [A]$$

Como el terreno donde se ubica la Subestación Eléctrica es uniforme y la malla se encuentra enterrada a 0.4 [m] de profundidad, entonces, para la resistencia de la red de tierra se utiliza la siguiente ecuación

$$R_1 = \rho \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right)$$

⁶ Dato proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad.

$$R_1 = 25 [\Omega * m] \left(\frac{1}{2681.8 [m]} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5226.52 [m^2]}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.4 [m] \sqrt{\frac{20}{5226.52 [m^2]}}} \right) \right) = 0.1621 [\Omega]$$

Ahora se calcula el área transversal del conductor de la red de tierra

Con el uso de uniones de soldadura de latón y un tiempo de falla de $0.5 [s]$, con el valor de la Tabla 2 la sección mínima del conductor de cobre por Amper que prevenga la fusión es $6.5 [circular \text{ mils}/A]$

$$a_2 = \text{Sección mínima} * I''$$

$$a_2 = 6.5 [circular \text{ mils}/A] * 35844.5856 [A] = 232989.8064 [circular \text{ mils}]$$

En la Tabla 3 vemos que este valor corresponde a un calibre comercial de $250 [kcmil]$ o $4.7/0 [AWG]$, pero en la realidad, la subestación tiene instalado cable de calibre $4/0 [AWG]$ y es el que utilizaremos para continuar con los cálculos.

Igualmente, en la Tabla 3 podemos ver que el diámetro del cable de calibre $4/0$ es $d = 0.01168 [m]$

La elevación de tensión de la red de tierra es

$$E_2 = I'' * R_1$$

$$E_2 = 35844.5856 [A] * 0.1621 [\Omega] = 5810.5701 [V]$$

Para conocer el potencial de malla primero se deben calcular los coeficientes K_m y K_i

El coeficiente K_m se calcula así

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} * \ln\left(\frac{D^2}{16 * h * d}\right) + \frac{1}{\pi} * \ln\left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \dots\right)$$

$$K_m = \frac{1}{2 * 3.1416} * \ln\left(\frac{(4 [m])^2}{16 * 0.4 [m] * 0.0116 [m]}\right) + \frac{1}{3.1416} * \ln\left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \dots * \frac{27}{28} * \frac{29}{30} * \frac{31}{32}\right) = 0.4487$$

El número de factores del segundo término es igual al número de conductores longitudinales menos dos, o sea 15

Ahora se debe calcular y redondear el factor de irregularidad

$$K_i = 0.65 + 0.172 * n$$

$$K_i = 0.65 + 0.172 * 17 \approx 4$$

Como se ve en la Figura 18, tenemos un diseño de 20 conductores transversales y 17 longitudinales, con separación $D = 4 [m]$, profundidad de la red $h = 0.4 [m]$ y longitud total de conductor $L = 2681.8 [m]$.

El potencial de malla se obtiene de la siguiente manera

$$E_{malla_2} = K_m * K_i * \rho * \frac{I''}{L}$$

$$E_{malla_2} = 0.4487 * 4 * 25 [\Omega * m] * \frac{35844.5856 [A]}{2681.8 [m]} = 599.7809 [V]$$

Para calcular el potencial de paso primero se debe conocer el factor geométrico K_s , el número de los términos dentro del paréntesis es igual al número de conductores transversales de la malla pero, es posible tener una buena aproximación considerando solamente los primeros cinco aunque, en nuestro caso calcularemos los 20 términos.

$$K_s = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{2 * D} + \frac{1}{3 * D} + \dots + \frac{1}{19 * D}\right)$$

$$K_s = \frac{1}{3.1416} * \left(\frac{1}{2 * 0.4 [m]} + \frac{1}{4 [m] + 0.4 [m]} + \frac{1}{2 * 4 [m]} + \frac{1}{3 * 4 [m]} + \dots + \frac{1}{19 * 4 [m]} \right)$$

$$= 0.6729 [1/m]$$

Ahora se debe calcular el potencial de paso en el perímetro de la malla que es donde se presentan los valores más altos de voltaje.

$$E_{paso_2} = K_s * K_i * \rho * I'' * \frac{1}{L}$$

$$E_{paso_2} = 0.6729 [1/m] * 4 * 25 [\Omega * m] * 35844.5856 [A] * \frac{1}{2681.8 [m]}$$

$$= 899.48710 [V/m]$$

Se calcula y compara el potencial tolerable por el cuerpo humano para una persona de 70 [kg].

$$E_{paso_{\odot_1}} = \frac{157 + 0.9 * \rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_{contacto_{\odot_1}} = \frac{157 + 0.23 * \rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_{paso_{\odot_1}} = \frac{157 [V/m * s^2] + 0.9 [A/m^2 * s^2] * 25 [\Omega * m]}{\sqrt{0.5 [s]}} = 253.8513 [V/m]$$

$$E_{contacto_{\odot_1}} = \frac{157 [V/s^2] + 0.23 [A/m * s^2] * 25 [\Omega * m]}{\sqrt{0.5 [s]}} = 230.1632 [V]$$

Vemos que la tensión de paso en la Subestación Eléctrica es mayor a la tolerable por el cuerpo humano

$$¿ E_{paso_2} < E_{paso_{\odot_1}} ?$$

$$899.48710 [V/m] > 253.8513 [V/m]$$

Y pasa lo mismo con la tensión de contacto

$$¿ E_{malla_2} < E_{contacto_{\odot_1}} ?$$

$$599.7809 [V] > 230.1632 [V]$$

Estos resultados son muy desalentadores, pero como en la subestación existe una plancha de concreto, con $\rho_{concreto} = 1 \times 10^3 [\Omega \cdot m]$

$$E_{paso_{\odot_2}} = \frac{157 + 0.9 * \rho_{concreto}}{\sqrt{t}}$$

$$E_{contacto_{\odot_2}} = \frac{157 + 0.23 * \rho_{concreto}}{\sqrt{t}}$$

$$E_{paso_{\odot_2}} = \frac{157 [V/m * s^2] + 0.9 [A/m^2 * s^2] * 1000 [\Omega * m]}{\sqrt{0.5 [s]}} = 1494.8237 [V/m]$$

$$E_{contacto_{\odot_2}} = \frac{157 [V/s^2] + 0.23 [A/m * s^2] * 1000 [\Omega * m]}{\sqrt{0.5 [s]}} = 547.3006 [V]$$

Aún así, el valor de la Tensión de la malla en la subestación es mayor que la que soporta el cuerpo humano, afortunadamente parte de la energía generada en una falla se deriva por los cables de guarda que salen de la subestación.

Se toma en cuenta la corriente que se disipa en los hilos de guarda de cada torre

El radio equivalente de la superficie de cada torre es

$$r_T = \sqrt{\frac{\text{Área de la torre}}{\pi}}$$

La base de las torres es cuadrada y mide aproximadamente 8 [m] por lado

$$r_T = \sqrt{\frac{8 [m] * 8 [m]}{3.1416}} = 4.5135 [m]$$

La resistencia de cada torre R_T , considerando que la resistividad debajo de cada torre es la misma y uniforme es

$$R_T = \frac{\rho}{2 * \pi * r_T}$$

$$R_T = \frac{25 [\Omega * m]}{2 * 3.1416 * 4.5135 [m]} = 0.8815 [\Omega]$$

Se consideran tres torres por kilómetro de línea entonces, la resistencia por cada kilómetro de línea es

$$R_{T_{km}} = \frac{R_T}{3}$$

$$R_{T_{km}} = \frac{0.8815 [\Omega]}{3 [1/km]} = 0.2938 [\Omega * km]$$

La impedancia equivalente es entonces

$$Z_e = \sqrt{Z_1 * R_{T_{km}}}$$

Donde Z_1 es el valor de la impedancia del hilo de guarda, que en este caso tiene un valor de $1.8 [\Omega/km]$

$$Z_e = \sqrt{1.8 [\Omega/km] * 0.2938 [\Omega * km]} = 0.7272 [\Omega]$$

La impedancia equivalente por ser dos hilos de guarda es

$$Z_T = \frac{Z_e}{2}$$

$$Z_T = \frac{0.7272 [\Omega]}{2} = 0.3636 [\Omega]$$

Finalmente, la corriente I'' que llega a la subestación se reparte en forma inversamente proporcional a la resistencia de tierra R_1 , y a la resistencia de la red de hilos de guarda, o sea

$$I_{Z_T} = I'' * \frac{R_1}{R_1 + Z_T}$$

$$I_{Z_T} = 35844.5856 [A] * \frac{0.1621 [\Omega]}{0.1621 [\Omega] + 0.3636 [\Omega]} = 11052.1399 [A]$$

$$I_{R_1} = I'' * \frac{Z_T}{R_1 + Z_T}$$

$$I_{R_1} = 35844.5856 [A] * \frac{0.3636 [\Omega]}{0.1621 [\Omega] + 0.3636 [\Omega]} = 24792.4456 [A]$$

Haciendo las operaciones con el nuevo valor de corriente I_{R_1} obtenemos los siguientes valores de tensión de paso y de malla los cuales son comparados contra los tolerables por el cuerpo humano cuando se halla en una plancha de concreto

$$\dot{¿} E_{paso_1} < E_{paso_{\odot_2}}?$$

$$622.1437 [V/m] < 1494.8237 [V/m]$$

Y pasa lo mismo con la tensión de contacto

$$\dot{¿} E_{malla_1} < E_{contacto_{\odot_2}}?$$

$$414.8475 [V] < 547.3006 [V]$$

Con lo que se puede decir que la Subestación Eléctrica es segura ante una falla eléctrica, aunque los valores que arrojan los cálculos no son muy estimulantes, porque se basan en que la energía es derivada hacia afuera de la subestación. Es necesario realizar modificaciones a la malla de tierra de la Subestación, la solución que se eligió fue enterrar un anillo de cable de cobre de 1000 [kcmil] que rodeara todos los equipos eléctricos y se uniera firmemente a la malla existente.

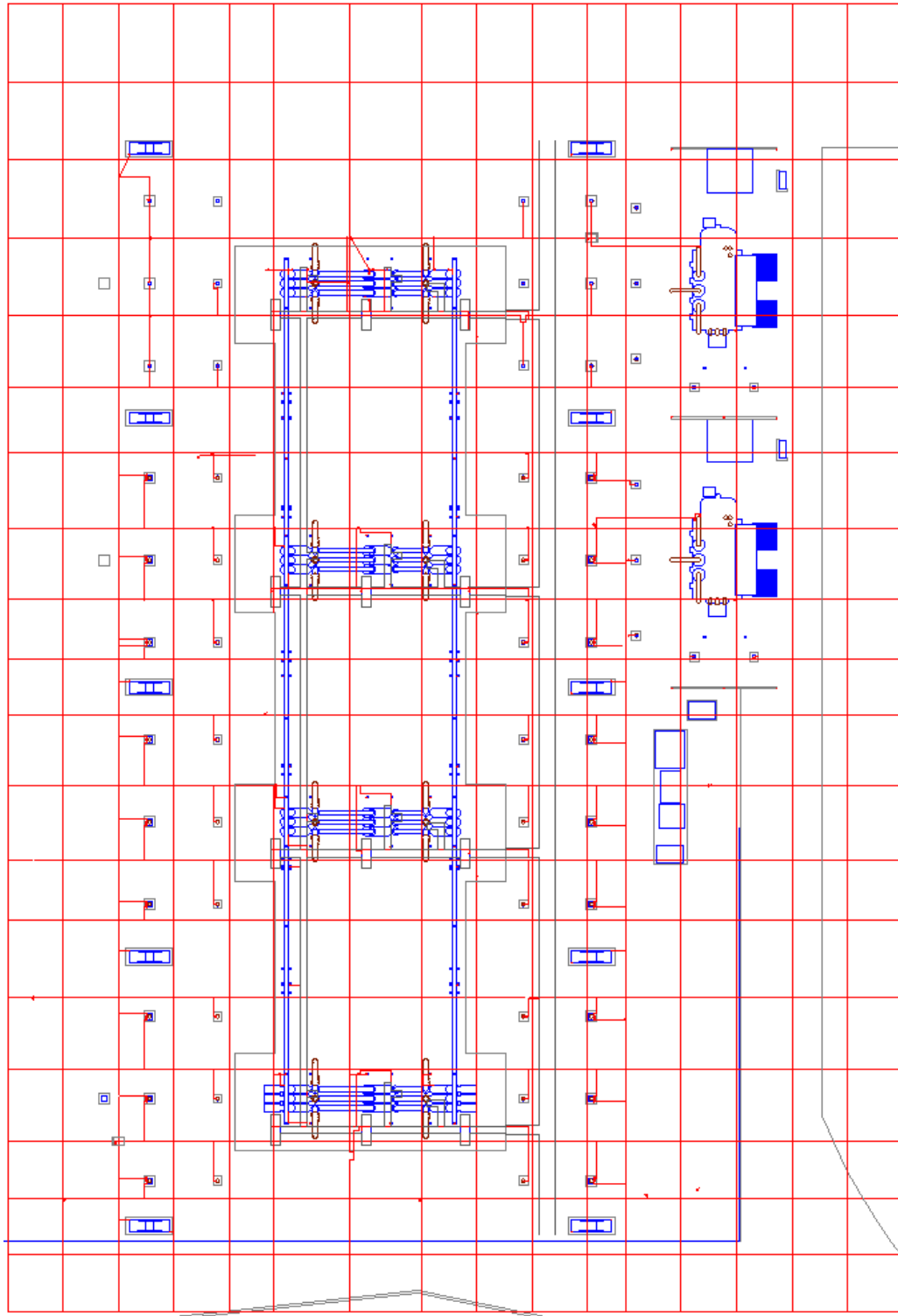


Figura 18. Plano de la Subestación Eléctrica. En el centro se ubican 12 interruptores en grupos de tres, están interconectados por las barras colectoras, arriba a la derecha se aprecian dos transformadores. En color rojo se muestra el entramado de la malla de tierra.

APÉNDICE 2

Memoria fotográfica de la rehabilitación de la red de tierra

Bien dicen que una imagen vale más que mil palabras pues, para una mejor comprensión de los trabajos del Sistema de Tierra, se muestran en una serie de imágenes las labores realizadas en la Rehabilitación del Sistema de Tierra de las Subestaciones Eléctricas del área metropolitana de la Ciudad de México.

Cada aspecto viene acompañado una información y de cuatro imágenes seguidas de un comentario que describe algunos detalles de cada una.

<p>Inspeccionar la zona</p> <p>Es indispensable que primeramente se inspeccione las instalaciones para así planear la logística de los trabajos que se van a realizar.</p>	 <p>Imagen 1. Panorámica que muestra los bastidores que soportan los cables de acometida. Se pueden ver los apartarrayos y más al fondo los interruptores y las barras colectoras.</p>	 <p>Imagen 2. Panorámica que muestra las tres fases de las barras colectoras y sus respectivos transformadores. Se aprecia la malla ciclónica impide el paso en el área.</p>
	 <p>Imagen 3. Panorámica que muestra, en primer plano, la torre estilizada que soporta los cables de energía. Se aprecian también los apartarrayos, los aisladores y el cuarto que resguarda los interruptores.</p>	 <p>Imagen 4. Panorámica que muestra un transformador y sus paredes a cada lado que protegen los alrededores en caso de algún incidente.</p>

Romper

En la mayoría de los casos las subestaciones de la ciudad, se encuentran con una capa de concreto que cubre la malla de tierra, para evitar levantar todo el concreto, se rastrean y excavan sólo los cruces de la malla que son los que deben ser reemplazados.



Imagen 5. Rompiendo el concreto con ayuda de un martillo eléctrico, se hace un camino para enterrar un anillo de cable nuevo.



Imagen 6. Con ayuda de pico, pala y cizallas se retira el concreto de un recuadro donde debe localizarse un cruce de la malla, en caso de no encontrar el cruce se excava un recuadro adyacente.



Imagen 7. Cortadora que ayuda a delinear en el concreto el área a excavar, de esta manera se tienen cortes limpios y con buena presentación.



Imagen 8. El cascajo debe acumularse en una zona de fácil acceso para que el camión recolector lo pueda retirar con facilidad.

Excavar

Generalmente la malla tiene una profundidad de 0.5 [m], el ancho de la excavación debe ser de 0.4 [m] como mínimo para poder introducir el molde y soldar de manera cómoda.



Imagen 9. Buscando el cruce de la malla de tierra.



Imagen 10. Amplia excavación donde aún no se encuentra rastro del cable de la malla de tierra. Se debe continuar buscando.



Imagen 11. Zanja que alojará el anillo de tierra que protegerá los interruptores ubicados dentro de los gabinetes azules (a la derecha).



Imagen 12. Parte de una zanja destinada a albergar el anillo de tierra que rodeará la subestación eléctrica.

Localizar

Para rehabilitar la malla no es necesario sustituir todo el cable, basta solamente con reemplazar las conexiones de los cruces, las conexiones hacia los equipos y las conexiones de los electrodos.



Imagen 13. Localización de la conexión del cable de una estructura con la malla de tierra.



Imagen 14. Cable principal del cual surgen derivaciones y cruces, los cuales deben ser reemplazados.



Imagen 15. Cruce de la malla de tierra dentro de una subestación eléctrica.



Imagen 16. Cruce de la malla y electrodo de tierra junto con su conexión, todas las uniones serán reemplazadas.

Perforar

Para evitar rodear zonas y desperdiciar el cable de cobre, es necesario perforar paredes y superficies, de esta manera el cable cruza directamente para llegar a su objetivo.



Imagen 17. El cable principal se encuentra bajo la superficie, se desea aterrizar una estructura en el exterior, por lo que se perfora para tener un atajo.



Imagen 18. Se desea perforar la pared de fondo donde se ubican los interruptores a aterrizar.



Imagen 19. Se necesita llegar hasta donde están unos cables a la derecha, es imprescindible realizar la perforación.



Imagen 20. Para aterrizar el ángulo metálico (de negro atrás de los trabajadores) se debe llegar a una trinchera que aloja el cable de tierra.

Suministros

Normalmente no se menciona pero, es muy importante llevar contabilidad de todos los suministros, pues a falta de algún material, el proyecto se atrasa y además puede encarecerse.



Imagen 21. Descarga de bultos de cemento para reponer el concreto.



Imagen 22. Rollo de 250 [m] de cable de cobre desnudo de calibre 250 [kcmil].



Imagen 23. Registro que sirve para ubicar y tener fácil acceso al electrodo de tierra para mantenimientos futuros.



Imagen 24. Arena y grava que junto con el cemento formarán la mezcla que se usará para restablecer el piso.

Rehabilitar cruces

El cable de cobre soporta muy bien el paso del tiempo y la corrosión, no así sus conexiones que por lo mismo deben ser reemplazadas.



Imagen 25. Abajo a la derecha se ve la llama que sale del molde al unir el cable de cobre.



Imagen 26. Molde de grafito, se notan los cables que entran junto con una macilla que evita que se derrame la soldadura y a la izquierda las pinzas de sujeción.



Imagen 27. Al fondo se aprecian los cables que desprovistos de su antigua unión serán soldados.



Imagen 28. Instante de la ignición de la pólvora que derrite la soldadura para unir los cables.

Colocar Electrodo

Para alcanzar las capas húmedas más profundas se utilizan electrodos, generalmente van acompañados de un registro. Para su instalación es necesario realizar una perforación de 3 [m] de profundidad y 0.1 [m] de diámetro, una vez introducido el electro y un cable de cobre en paralelo, la perforación se rellena con una solución de baja resistencia eléctrica.



Imagen 29. Registro que resguarda el electrodo de tierra, se aprecia el cable que conecta y atraviesa hacia la malla de tierra.



Imagen 30. Nivelando el registro con base en el suelo de alrededor.



Imagen 31. Vaciando la solución electrolítica para rellenar los espacios entre el electrodo y la tierra circundante.



Imagen 32. Perforación que se realiza para facilitar la introducción del electrodo de tierra.

Colocar cable

Existe la posibilidad de que no exista o no se encuentre el sistema de tierra de la subestación. En esos casos, se debe instalar un anillo de tierra que rodee las estructuras de los equipos eléctricos para que sean aterrizados.



Imagen 33. Se puede ver el carrete casi vacío pues, la mayoría del cable ha sido instalado.



Imagen 34. El uso de arco y segueta es inadecuado para el corte del cable, lo que se usa son cizallas que son rápidas y eficientes para esta labor.



Imagen 35. Se aprecia claramente la unión del cable nuevo (más brillante), con cable antiguo.



Imagen 36. Para aterrizar esta estructura se utiliza un tramo de cable que será unido a la malla de tierra que se encuentra enterrada.

Aterrizar estructuras directamente

Se pretende que todas las estructuras metálicas sean equipotenciales por lo que el cable de cobre debe conectarse a todas ellas, no importa su ubicación o si son de difícil acceso. Conviene además que el cabo del cable se funda en una sola pieza con la estructura que aterrizará para tener una sólida unión.



Imagen 37. Uniendo el soporte de una grúa aérea a la malla de tierra.



Imagen 38. Molde presionado fuertemente a la estructura, el cable a soldar se introduce en la parte inferior.



Imagen 39. Aterrizamiento de una estructura aérea de la subestación. Por seguridad es indispensable el uso de equipo de protección.



Imagen 40. Anteriormente, el cable de tierra estaba unido a las estructuras con zapatas y tornillos, estos fueron sustituidos con uniones sólidas de soldadura exotérmica.

Aterrizar estructuras con zapata

Es preferible unir el cable a la estructura fundiéndolo en una sola pieza pero, en la combustión se generan altas temperaturas que puede fundir y atravesar la pared de la estructura o debido al poco espacio no es posible colocar el molde. En esos casos sea hace necesario el uso de zapatas.



Imagen 41. Aterrizando con zapata la base del apartarrayo. Se puede apreciar el apartarrayo, abajo su estructura y arriba el conductor energizado de 230 [kV].



Imagen 42. Existen pequeñas barras de cobre que sólo pueden unirse por medio de zapatas, pues de otra manera el calor las derretiría.



Imagen 43. El tanque de este transformador tiene un espacio exclusivo para colocar las zapatas que lo aterrizan.



Imagen 44. Pueden verse varias zapatas unidas a una solera de cobre que funciona como un nodo de tierra para los interruptores.

Fijar

El paso de la corriente de falla a través del cable de cobre genera una fuerza que provoca que el cable chicotee, para evitar un movimiento no deseado o su desconexión es necesario que el cable que no esté enterrado sea fijado por medio de abrazaderas tipo uña.



Imagen 45. Con ayuda de un taladro se perfora y fija la uña que abrazará al cable de cobre.



Imagen 46. Fijando el cable de tierra a la pared de una trinchera inundada por las lluvias.



Imagen 47. Debe cuidarse la presentación de los trabajos por lo que el cable debe quedar perfectamente estirado en línea recta.



Imagen 48. Colocando la pija que sujetará la abrazadera y el cable de cobre.

Limar

Cuidando la seguridad y la presentación de los trabajos, todas las soldaduras deben ser limadas para que todos sus bordes sean alisados y carentes de picos. Para esta labor se hace necesario el uso de esmeril.



Imagen 49. Cabe destacar que para unir el cable a la estructura, primero debe limarse su superficie retirando pintura, óxido y dejando el metal al descubierto.



Imagen 50. Limando los bordes afilados o rebabas de la soldadura para seguridad y mejor presentación.



Imagen 51. Limando las rebabas que dejan los intersticios del molde al soldar una zapata al cable de cobre.



Imagen 52. Primeramente debe limarse la estructura a soldar y enseguida los remanentes de soldadura.

Pintar

Para proteger las uniones contra los agentes ambientales, es necesario pintarlas con una capa de pintura protectora y como cada estructura tiene sus respectivos colores, también una capa de pintura del mismo color que tenía la estructura.



Imagen 53. Pintando las uniones en la base de un pequeño transformador de servicios propios.



Imagen 54. Aplicando la primera capa, enseguida debe pintarse cada una de las soldaduras de su respectivo color de manera que se mimeticen.



Imagen 55. Protegiendo las zapatas de la barra de tierra de unos interruptores.



Imagen 56. Aplicando una de las capas de pintura a la zapata que aterriza la barra de tierra del gabinete que controla un interruptor.

Rellenar

Una vez que toda la malla de tierra ha sido rehabilitada y todas las estructuras unidas a la malla, se procede a rellenar todos los hoyos, zanjas y demás perforaciones de la subestación. La tierra debe ser apisonada para que tenga buen contacto con el cable de cobre.



Imagen 57. Rellenando la zanja y la periferia de un registro de electrodo de tierra.



Imagen 58. Herramienta que sirve para apisonar la tierra. Si la tierra no es apisonada se corre el riesgo de que el concreto se cuarte por hundimiento.



Imagen 59. Con ayuda de una pala se rellena la zanja, posteriormente con una escoba se barre hacia la misma zanja toda la tierra restante.



Imagen 60. El cascajo debe desecharse y no utilizarlo para rellenar pues su resistencia eléctrica es muy elevada.

Reponer

Ya que todos los trabajos han sido realizados y si se excavó en la plancha de concreto, ésta debe ser repuesta. El concreto sirve como un piso de fácil tránsito y además ayuda a prevenir el paso de la corriente de falla por el cuerpo humano pues su resistencia eléctrica es muy alta y se suma en serie con la resistencia del cuerpo.



Imagen 61. Todos las áreas deben reponerse tal y como fueron encontradas al inicio de los trabajos.



Imagen 62. El concreto nuevo debe nivelarse con respecto al piso de alrededor y de preferencia peinarlo con la escoba para darle una mejor presentación.



Imagen 63. Con ayuda de pala y carretilla la mezcla es llevada hasta donde se necesita.



Imagen 64. Al fondo a la izquierda puede verse la máquina mezcladora en desuso pues, en ocasiones los trabajadores prefieren hacer la mezcla de la manera tradicional.

Limpiar

Como última tarea, todas las zonas de la subestación donde se realizaron trabajos deben limpiarse para dar una mejor presentación y evitar accidentes.



Imagen 65. Trabajos finalizados y zona de trabajo limpia.



Imagen 66. Cuarto de baterías limpio, lugar donde permanecieron las herramientas de trabajo.



Imagen 67. Cuarto de interruptores, siendo limpiado al finalizar los trabajos.

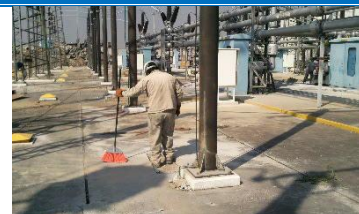


Imagen 68. La escoba es la herramienta imprescindible para este tipo de labores.

Oportunidades

No siempre las cosas salen como uno quisiera, en esos casos se presenta la oportunidad de aprender y realizar los trabajos de mejor manera.

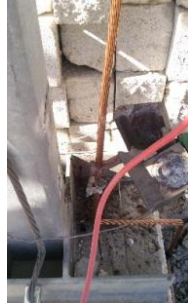


Imagen 69. A la derecha el molde abierto, al centro la soldadura fallida que debió unirse a la estructura de la izquierda.



Imagen 70. Molde con el cable a soldar y la soldadura en estado líquido derramada.



Imagen 71. Cable que debía unirse a la base metálica sobre la que está. El calor fundió el cable y no alcanzó a fundir la base, por lo que el cable se trozó.



Imagen 72. Las altas temperaturas derritieron el cable y todo el material se derramó. Pueden verse las rebabas que escurrieron por el interior del molde.

Coordinación con otros proyectos

Las subestaciones eléctricas son áreas que siempre están en mantenimiento y remodelación por lo que normalmente se encuentran trabajadores de distintas empresas realizando labores. Es muy importante la coordinación para no obstruir mutuamente los trabajos.



Imagen 73. Zanja para cimentación de una barda, en primer plano se aprecia el cable de tierra que fue arrancado.



Imagen 74. Registro que obstruye el paso del cable de cobre de la malla de tierra.



Imagen 75. Instalación de nuevos equipos no contemplados en el proyecto original pero que deben ser aterrizados.



Imagen 76. Trabajadores realizando tareas ajenas en la zona donde corre el cable de la malla de tierra.

BIBLIOGRAFÍA

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Guide for Safety in AC Substation Grounding. STD-80-2000-IEEE. United State of America, IEEE, 2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. STD-81-1983-IEEE. United State of America, IEEE, 1983.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. STD-1100-1999-Emerald Book-IEEE. United State of America, IEEE, 1999.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas*. NRF-011-CFE. México, CFE, 2004.

SECRETARÍA DE ENERGÍA, *Instalaciones Eléctricas (utilización)*. NOM-001-SEDE-2005. México, 2005.

RAÚLL MARTÍN, José. Diseño de Redes de Tierra. En: RAÚLL MARTÍN, José. *Diseño de Subestaciones Eléctricas*, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2ª ed., 2000, cap. 4 p. 231-290.

GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. *La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T.*, España, Marcombo S. A., 1ª ed, 1991, 139 p.

MORENO OSPINA, Germán. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Respuestas ante fallas eléctricas y rayos.*, Colombia, Editorial Universidad del Antioquia, 1ª ed., 2007, 194 p.

H. OLSON, Walter. Electrical Safety. En: G. WEBSTER, John; W. CLARK, John; R. NEUMAN, Michael; H. OLSON, Walter. *Medical Instrumentation Application and Design*, New York, John Wiley & Sons, Inc. 4a ed., 1999, cap. 14 p. 638-673.

GRUPO CONDUMEX. *Manual técnico de instalaciones eléctricas en baja tensión*, México, Servicios Condumex S.A. de C.V., 5ª ed, 2009, 288 p.

