

CAPÍTULO 5

ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

5.1. MODIFICACIONES Y NUEVO EQUIPO

Tal como se muestra, en el capítulo 3 se realizó un estudio del sistema eléctrico actual y del diseño de las subestaciones que alimentan cada una las torres del Estadio Olímpico Universitario, ahora, teniendo en cuenta la nueva carga instalada en las torres de alumbrado y con las modificaciones realizadas para las necesidades del estudio, que constara únicamente de 54 luminarias de 2,250 [W] incluyendo el balastro y divididos en 18 circuitos, cada uno de estos circuitos controlara 3 luminarias, así que cada uno de éstos tendrá una carga de 5400 [W]. Como se muestra en la figura 5.1.

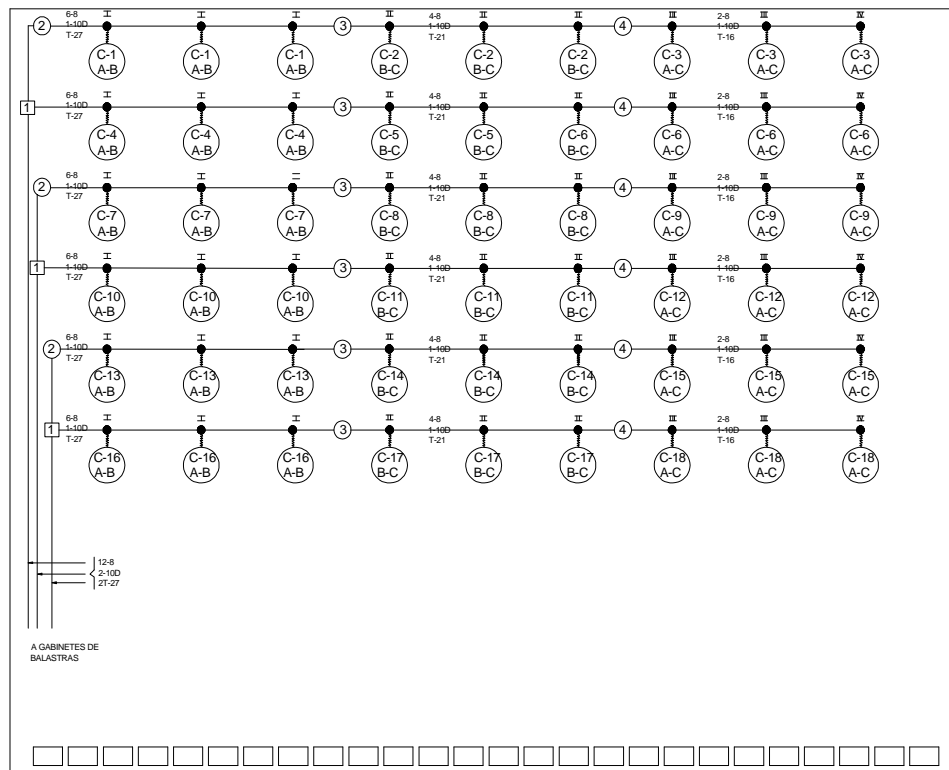


Figura 5.1 Arreglo en la distribución de los circuitos para las lámparas de cada torres

En las subestaciones se opto por realizar cambios; uno de ellos es la desaparición de uno de los 2 transformadores, sin embargo, para mantener la configuración original de un doble anillo y garantizar la continuidad de energía eléctrica se incrementará la capacidad de las plantas de emergencia en cada una de las torres; las plantas de emergencia incluidas en cada subestación tienen una capacidad de 250 [kW].

En la figura 5.2 se muestra la distribución de los equipos en la subestacion1, de tal manera que, como se menciona en el capítulo 3, la distribución es básicamente la misma en las cuatro subestaciones. Para mayor información de la nueva distribución de las subestaciones ver el anexo 1.

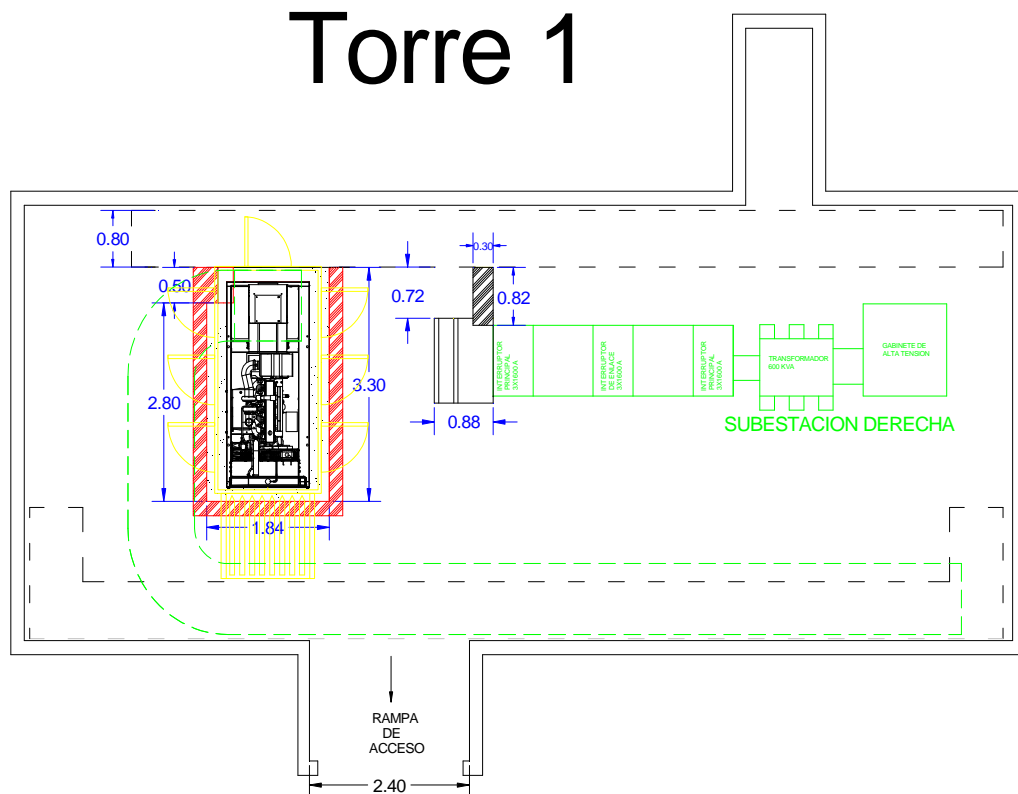


Figura 5.2 Nueva distribución y conexión en las subestaciones de las torres

También se incluye un tablero de medición y control automático para el encendido de las luminarias con las siguientes especificaciones. Ver tabla 5.1.

Voltaje [v]	220/127
Frecuencia [Hz]	60
Revoluciones por minuto [rpm]	1800
Factor de potencia [fp]	0.8
Sistema	3 F - 4 H
Capacidad interruptiva (A)	3 x 800

Tabla 5.1 Especificaciones del tablero de medición

El control se encarga de proporcionar las señales de arranque, paro, control y protección de la planta generadora de energía eléctrica. Monitorea el voltaje de la red normal y del generador, censa alto y bajo voltaje, alta y baja frecuencia para ambas fuentes, controlando automáticamente las funciones de la unidad de transferencia.

Todo esto a través de un display de cristal líquido (LCD) que proporciona la información del estado de operación del equipo y los valores de instrumentación en tiempo real.

Dicho tablero de control incluye botones de dialogo para la selección del modo de operación del sistema.

- Paro / desbloqueo
- Operación manual
- Modo de prueba
- Operación automática
- Arranque

El módulo monitorea por medio de sensores analógicos, los valores de presión de aceite, temperatura de la máquina y nivel de combustible para mostrar las lecturas adecuadas de los valores correspondientes en tiempo real en el display de cristal

líquido, donde se mostrara el estado de operación de la unidad de transferencia, adicionalmente se indica si algún parámetro de la red normal o del generador esta fuera de límites.

5.2. CONDUCTORES Y CANALIZACIÓN.

Ahora, tomando en cuenta las modificaciones y las características para las nuevas luminarias y basándonos en la figura 5.1, haremos el cálculo de los calibres de cable adecuado y también para la canalización, empleando la norma oficial mexicana NOM-001-SEDE2005 (Ver anexo 2).

Alimentador circuito 1

Para el cálculo se cuenta con los siguientes datos (figura 5.2):

Carga	6,750 [W]	Voltaje	220 [v]
Longitud	32.76 [mts]	Factor de demanda F.d	1.0
Caída de tensión e %	3.0 %	Factor de agrupamiento f.a	0.8
Sistema	2F – 3H	Factor de temperatura f.t	1.0

Tabla 5.2. Datos para el cálculo de conductores y canalización.

El cálculo de la corriente nominal, así como de la corriente corregida se muestra a continuación:

$$I_n = \frac{W}{2V_{f-n} \cos\theta} \quad (5.1)$$

$$I_n = \frac{6750}{2 \cdot 127 \cdot 0.9} = 29.53 [A]$$

$$I_c = \frac{I_n \cdot F \cdot d}{f \cdot a \cdot f \cdot t} \quad (5.2)$$

$$I_c = \frac{29.53 \cdot 1.0}{0.8 \cdot 1.0} = 36.91[A]$$

Por ampacidad de la tabla 310-16 de la NOM-001-SEDE-2005, tenemos:

Para una temperatura nominal del conductor de 75 [°C] y una corriente de 50 [A] un **conductor calibre 8 AWG THW-LS**.

Para la selección del conductor por caída de tensión ésta debe ser menor al 3%. En el siguiente cálculo se obtiene el valor de la caída de tensión. Para esto se requieren de los valores de resistencia y reactancia de los conductores.

De la tabla de valores de resistencia y reactancia para cables de 600 V, 60 Hz, 75 °C de la NEC 2008, tenemos:

$$R = 2.56 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0.213 \Omega/\text{km}$$

$$e\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot L \cdot 100 \cdot [(R \cos\theta) + (X \sin\theta)]}{V_{f-f} \cdot 1000} \quad (5.3)$$

$$e\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 36.91 \cdot 32.76 \cdot 100 \cdot [(2.56 \cdot 0.9) + (0.213 \cdot 0.436)]}{220 \cdot 1000} = 2.28\%$$

Para el cálculo de la protección aplicamos incremento del 25% de la corriente corregida.

$$I_{int} = I_c \cdot 1.25 = 46.14[A] \quad (5.4)$$

Este nuevo valor de corriente encontrado es que se va a emplear para determinar la protección en tablero. Por lo que se utilizará un Interruptor Termomagnético con capacidad de 50 [A].

De la tabla 250-95 de la NOM-001-SEDE-2005 correspondiente al Tamaño nominal mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos, se determina para una protección contra sobrecorriente de 50 [A] un conductor de puesta a tierra calibre 10 AWG.

Cableado: 6 - 8 AWG, 2 F, 1 - 10 AWG T

Para el cálculo de la canalización, empleamos las tablas 10-4 y 10-5 del capítulo 10 de la NOM-001-SEDE-2005.

Canalización: 6 - 8 AWG = 169.2 mm²
1 - 10 AWG = 15.7 mm²
Total = 184.9 mm²

Por lo tanto, le corresponde una tubería de 27 (1) de acuerdo a las tablas anteriormente mencionadas. Ver anexo 2.

Como se ha mencionado anteriormente, para que el sistema no sea complejo la distribución en cada una de las torres es la misma, por lo que los cálculos de tubería y canalización son prácticamente los mismos para cada una de las torres.

En la siguiente Tabla 5.3 se muestran los resultados de los cálculos realizados para tubería y canalización de una de las torres. Para determinar los valores de la tabla se empleó el mismo procedimiento que para el circuito 1, calculando los conductores y canalizaciones por caída de tensión, observando que en ningún

circuito esta excede el valor planteado de 3%. Éstos resultados son los que se emplearán para cada una de las cuatro torres.

Circuitos	Carga [W]	L [mts]	In [A]	Ic [a]	Cal [AWG]	e%	Int	Cal tierra [AWG]	Canalización cond-cal	Tubería
1 y 4	6750	32.76	29.53	36.91	8	2.28	2p 50A	10	6 - 8 1 - 10	27(1)
2 y 5	6750	36.78	29.53	36.91	8	2.56	2P 50A	10	4 - 8 1 - 10	21(3/4)
3 y 6	6750	41.62	29.53	36.91	8	2.89	2p 50A	10	2 - 8 1 - 10	16(1/2)
7 y 10	6750	29.3	29.53	36.91	8	2.04	2p 50A	10	6 - 8 1 - 10	27(1)
8 y 11	6750	34.22	29.53	36.91	8	2.38	2p 50A	10	4 - 8 1 - 10	21(3/4)
9 y 12	6750	39.06	29.53	36.91	8	2.61	2p 50A	10	2 - 8 1 - 10	16(1/2)
13 y 16	6750	26.65	29.53	36.91	8	1.85	2p 50A	10	6 - 8 1 - 10	27(1)
4 y 17	6750	31.57	29.53	36.91	8	2.19	2p 50A	10	4 - 8 1 - 10	21(3/4)
15 y 18	6750	36.41	29.53	36.91	8	2.53	2p 50A	10	2 - 8 1 - 10	16(1/2)

Tabla 5.3 Resultados para el cálculo de conductores y canalización de cada Circuito

5.2. SISTEMA DE TIERRAS

Dentro de las protecciones de este nuevo sistema eléctrico se debe mencionar que el sistema de tierras no será modificado ya que, como se mostró anteriormente en el análisis del capítulo 3 (apartado 3.4), éste cuenta con una baja impedancia y por lo tanto no es necesario realizar modificaciones. Sin embargo, en este apartado

se hará uso de las herramientas necesarias para proponer un sistema de tierras para cada una de las torres del estadio.

El estadio y, en específico, las subestaciones ubicadas en cada una de las torres, no cuentan con un sistema de tierras propio para las exigencias de un escenario como el EOU, por ello, es necesario que cada una de las subestaciones cuente con su propio sistema de tierras.

Para que un sistema de tierras funcione satisfactoriamente, debe cumplir con ciertos requisitos; el diseño puede ser simple, desde una varilla de tierra hasta algo más complejo como una malla de tierras para una planta, por mencionar algo. En el diseño intervienen factores diversos como son: la resistividad del terreno, el voltaje del servicio, la potencia de cortocircuito, la corriente de cortocircuito, el espacio disponible, el personal y equipo a proteger, etc.

En este caso CU cuenta con un terreno rocoso de diferentes especificaciones como roca volcánica y sedimentaria; para este parámetro es necesario realizar medición de campo, pero además de que es difícil realizar esta medición por las condiciones del terreno, no se cuenta con el dispositivo de medición. Es por eso que tomaremos como valor de resistividad del terreno $160 [\Omega \cdot m]$ ²⁴ tomado de mediciones realizadas para proyectos anteriores en el estadio.

Ahora, nuestro sistema de tierras lo haremos para el lado de baja tensión ya que el reglamento de instalaciones eléctricas²⁵ exige a los usuarios de energía eléctrica tener su propia conexión a tierra. En el mismo reglamento se menciona: “El valor de la resistencia a tierra de los electrodos artificiales no debe ser superior a $25 [\Omega]$, en las condiciones más desfavorables”. Sin embargo, los fabricantes de equipos de computo, comunicaciones, etc. Piden un valor de resistencia a tierra bastante

²⁴ El dato de la resistividad del terreno fue proporcionado por la DGOyC de la UNAM.

²⁵ Libro “Sistemas de Tierras en Redes de Distribución”

menor que puede ser 3 o 5 [Ω] para poder dar validez a las garantías y a la vez proteger a los equipos.

En este diseño se utilizarán electrodos múltiples para obtener un valor de resistencia a tierra de 10[Ω] o menor, debido a que la carga instalada pueda aumentar y con esta también la corriente de cortocircuito, pero también se usará para dar una mejor protección a nuestros equipos.

A partir del valor de la resistividad del terreno [ρ] se determinará su valor de resistencia a tierra con un solo electrodo de puesta a tierra, ya que en realidad éste es el valor que se interesa conocer. La resistencia total de un electrodo puede dividirse en tres partes:

1. La resistencia propia del conductor.
2. La resistencia de contacto entre el electrodo y la tierra.
3. La resistencia de la masa de tierra que rodea al electrodo.

De estas tres, la última es el valor más significativo de resistencia a tierra ya que los otros valores pueden ser despreciados. Ahora se consideran los flujos de corriente en todas direcciones, ya que la corriente tiene una trayectoria infinita. Tal como se muestra en la figura 5.3.

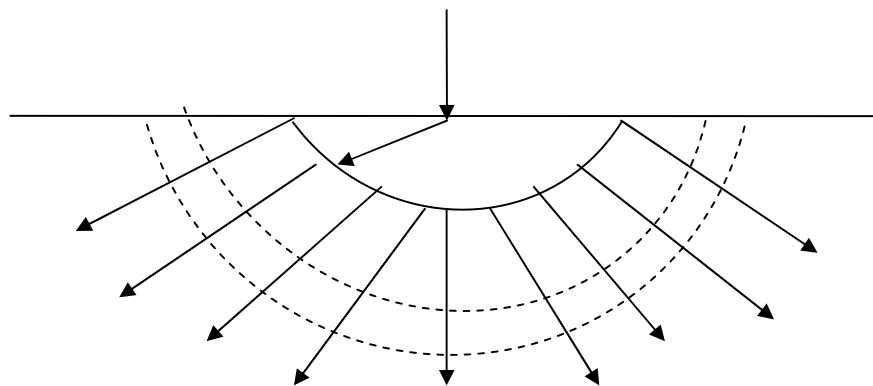


Figura 5.3 Flujos de corriente en un Electrodo Hemisférico

La fórmula general para determinar la resistencia de los electrodos se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$R = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (5.5)$$

Ahora bien, para poder aplicar la formula 5.5 a cualquier electrodo se tiene:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot C} \quad (5.6)$$

Donde C es la capacidad electrostática de un electrodo combinado con su imagen en la superficie de la tierra. Una buena aproximación de un electrodo es considerándolo como la mitad de un elipsoide de revolución en el que su eje mayor "a" es muy largo en comparación con su eje menor "b" y a partir de esto se puede emplear la siguiente expresión:

$$C = \frac{a}{2 \cdot \ln \frac{2a}{b}} \quad (5.7)$$

Así, sustituyendo en la formula general se obtiene:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad (5.8)$$

Donde:

- ρ Resistividad del terreno.
- L Longitud del electrodo.
- d Diámetro de la varilla.

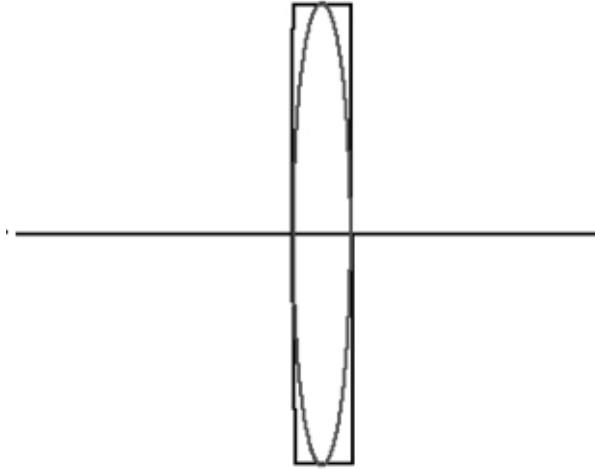


Figura 5.4 Electrodo con su imagen considerado como un elipsoide de revolución

Ahora, si se coloca un electrodo 5/8" con una longitud de 3 [m] y diámetro de la varilla de 0.016 [m], se obtiene:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot Ln \frac{4 \cdot L}{d} = \frac{160}{2 \cdot \pi \cdot 3} \cdot Ln \frac{4 \cdot 3}{0.016} = 56.19[\Omega]$$

Como se puede observar. el valor de la resistencia es muy elevado y por ello se emplearan métodos para reducir este valor. Estos métodos pueden ser diversos, desde aumentar el diámetro de la varilla, utilizar sustancias químicas que bajen la resistividad del terreno o bien, utilizar electrodos múltiples.

El electrodo común, es un medio económico de instalar un sistema de tierras, sin embargo, generalmente su valor es muy alto. El método de electrodos múltiples es un procedimiento de colocar varios electrodos en arreglos simples o complejos, dependiendo de como se desee el valor de la resistencia a tierra; estos arreglos pueden ser dos electrodos en paralelo, tres electrodos en delta o bien una red de tierras que dependerá del área de la subestación y de otros parámetros.

Calcular el valor de dos o más electrodos en paralelo representa un margen de error ya que en los cálculos se considera suelo homogéneo en condiciones ideales, algo que en la práctica no acontece. Para calcular resistencias combinadas, se necesita calcular la capacidad de un caso análogo electrostático, puede hacerse por el método de la carga uniforme, usando en el cálculo de la resistencia de un electrodo sencillo, es decir, suponer que las cargas están distribuidas uniformemente sobre ambos electrodos,; los electrodos se sustituyen por electrodos hemisféricos, para simplificar los cálculos y así el potencial de una esfera de radio “r” es:

$$V = \frac{Q}{r} \quad (5.9)$$

Donde:

Q es la carga de la esfera.

Así el potencial a una distancia “d” de la esfera es:

$$V_d = \frac{Q}{d} \quad (5.10)$$

Si se tienen dos electrodos en paralelo a una distancia “d”, cada electrodo puede ser remplazado por una carga equivalente, o sea, por una hemisférica de radio “r” y carga “Q”, obteniendo:

$$V = \frac{Q}{r} + \frac{Q}{d} = \frac{Q}{r}(1 + a); \quad a = \frac{r}{d} \quad (5.11)$$

Sabiendo que $C = \frac{Q}{V}$; sustituyendo en la formula general resulta:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot (1 + a) \quad (5.12)$$

Dividiendo entre la resistencia de un electrodo enterrado R_1 .

$$R_{eq} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot (1 + a)}{\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}} = \frac{1 + a}{2} \quad (5.13)$$

Graficando estos valores se obtiene la siguiente gráfica.

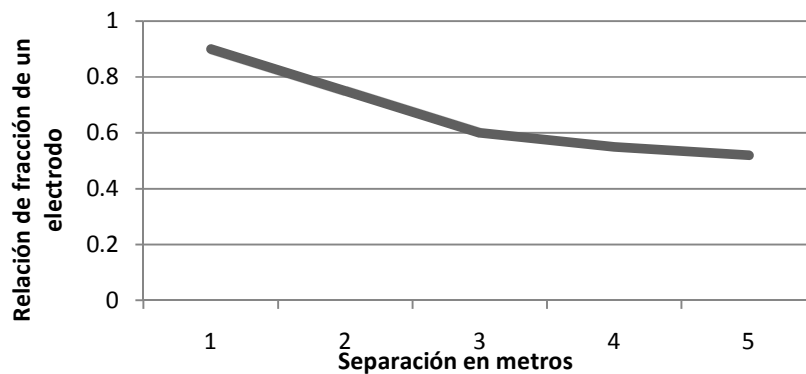


Figura 5.5 Gráfica para dos electrodos en paralelo.

De la grafica anterior (figura 5.5) se puede decir que el valor de resistencia a tierra de un electrodo se reduce al 60% si se coloca otro electrodo en paralelo con una separación de 2 metros. De esta manera, se tienen arreglos de tres electrodos en paralelo, cuatro en línea recta o tres electrodos en delta, lo que representaría el arreglo que se propone en este diseño.

Para estos arreglos se utiliza el mismo procedimiento anteriormente descrito para dos electrodos en paralelo obteniendo los siguientes resultados.

- Tres electrodos en línea recta:

$$R_{eq} = \frac{1 + 2^a}{3} \quad (5.14)$$

- Cuatro electrodos en paralelo:

$$R_{eq} = \frac{12 + 16a - 21a^2}{48 - 40a} \quad (5.15)$$

- Tres electrodos en delta:

$$R_{eq} = \frac{2 + a - 4a^2}{6 - 7a} \quad (5.16)$$

En la tabla 5.4 se muestra el porcentaje en que se disminuye el valor de resistencia de acuerdo a diferentes configuraciones de electrodos.

Número de electrodos.	Valor original.	El valor original se reduce a:
Un sólo electrodo.	100 %	---
Dos electrodos en línea.	---	55%
Tres electrodos en línea.	---	40%
Tres electrodos en delta.	---	38%
Cuatro electrodos en simetría.	---	28%
Ocho electrodos en simetría.	---	16%

Tabla 5.4 Porcentaje de reducción del valor resistivo en función del tipo de configuración.

A partir de los valores mostrados en la tabla 5.4 se observa el porcentaje que disminuye el valor de nuestra resistencia a tierra en función de la distancia de separación entre los electrodos; para tres electrodos en delta con una separación de 2 metros, el valor de resistencia disminuiría a un 38%. Éste es el diseño que se empleará.

Para el diseño del sistema de tierras del EOU se tiene un valor de resistencia a tierra con un solo electrodo de 56.192 Ω ; este valor es elevado, por esa razón se

propone un arreglo en delta de electrodos múltiples. Además de aumentar el diámetro del electrodo de 5/8" a 3/4" para bajar la resistencia a tierra del sistema.

El valor de resistencia resulta:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{4L}{d} = \frac{160}{2 \cdot \pi \cdot 3} \cdot \ln \frac{4 \cdot 3}{0.019} = 54.73[\Omega]$$

Ahora bien, si se agregan 2 electrodos en un arreglo en delta con una separación de 4 metros (véase figura 5.6) ya que, basándose nuevamente en la NOM-001-SEDE-2005 artículo 250-83,²⁶ donde indica que la distancia entre ellas o de cualquier electrodo no debe ser menor a 1,8 [m], aunque se recomienda que estén separadas más del largo de cualquiera de ellas, tenemos entonces una reducción al 38% de nuestro valor con un solo electrodo. Si esto es así, resulta que:

$$R_{\Delta} = 54.73 \cdot 0.38 = 20.79[\Omega]$$

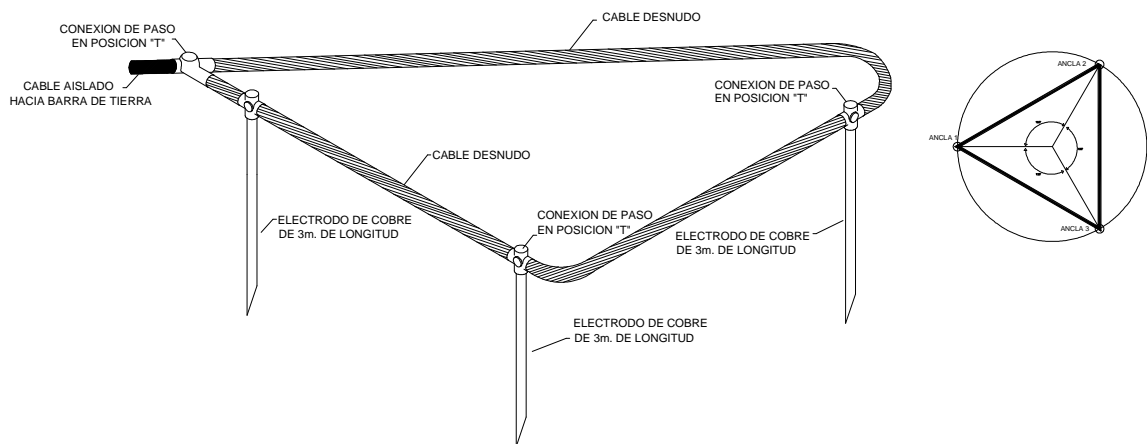


Figura 5.6 Arreglo en delta

Como se puede observar el sistema cumple con los requerimientos de la NOM-001-SEDE-2005, pero como mencionamos al principio del diseño, el valor

²⁶ Véase Anexo 2

requerido debe estar alrededor de los 10[Ω], de acuerdo a los equipos electrónicos instalados y contemplando el crecimiento a futuro de la carga. Por esta razón se sugiere un diseño con ocho electrodos en simetría que, como se muestra en la tabla 5.4, reduce el valor de resistencia a un 16% del valor inicial, resultando más del doble de lo que reduce el arreglo en delta. Por lo tanto:

$$R = 53.73 \cdot 0.16 = 8.75[\Omega]$$

Este valor es el buscado en el diseño, en la figura 5.7 se muestra el arreglo sugerido a partir de los cálculos mostrados anteriormente.

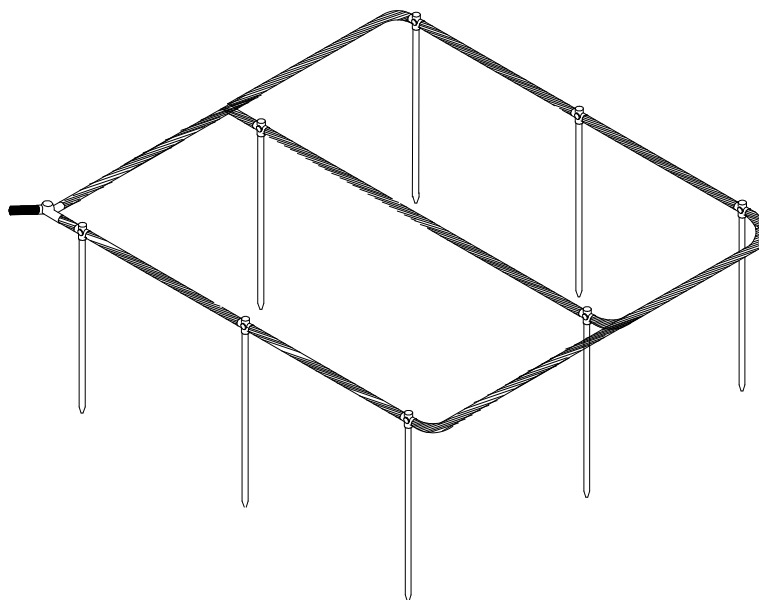


Figura 5.7 Arreglo de ocho electrodos simétricos

Una vez determinado el arreglo de electrodos se determinará el calibre de los conductores del sistema de tierra; éste conductor debe ser capaz de soportar durante un tiempo específico corrientes eléctricas en condiciones anormales como las de un cortocircuito, pero que no se requiere para conducir corriente eléctrica en condiciones normales de operación del circuito eléctrico.

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005 en su artículo 250-91 el material del conductor de puesta a tierra debe ser:

- De cobre o aluminio.
- Resistente a la corrosión que se pueda producir en la instalación y debe estar adecuadamente protegido contra la corrosión.
- Macizo o cableado, aislado, forrado o desnudo y debe ser de un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.

De acuerdo a la tabla 290-95 de la NOM-001-SEDE-2005²⁷ el tamaño nominal del conductor al electrodo de tierra es de cobre de **2 AWG**.

Con la determinación del calibre para los conductores de puesta a tierra, se propone emplear los valores calculados para las 4 torres con las que cuenta el estadio, es decir; se propone que cada una de las subestaciones cuente con su propio sistema de tierras, comprendiendo que un sistema de puesta a tierra sirve para proteger los aparatos eléctricos y electrónicos, pero el objetivo principal de éste sistema es garantizar las condiciones de seguridad de las personas que se encuentren dentro de las subestaciones, ya que la corriente eléctrica puede tener efectos parciales o totales, e incluso la muerte.

²⁷ Véase anexo 2.