



SERVICIOS DE INGENIERÍA – CESI GOMEZ
PALACIO. MÉXICO

Memoria de Cálculo del sistema de tierras.

GP-E-MC-IE-02

FEBRERO 2018.



RIVERO BORRELL - GUTARQS
ARQUITECTOS

ingenor

ENGINEERING >
ARCHITECTURE >
PROJECT >

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 2 de 23	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

INDICE

1. OBJETO 3

2. ALCANCE..... 3

3. CRITERIOS DE DISEÑO 3

4. NORMAS Y CÓDIGOS DE REFERENCIA..... 5

5. DEFINICIONES 5

6. DESARROLLO DE CÁLCULO 7

7. CONCLUSIONES 19

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 3 de 23	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

1. OBJETO.

Esta memoria de cálculo tiene por objeto establecer los criterios empleados para diseñar la Malla Principal del Sistema de tierras de las oficinas del CESI, en Gómez Palacio, Durango. La información contenida en este documento se complementa con los planos correspondientes a la red de tierra física.

2. ALCANCE.

La presente memoria de cálculo tiene como alcance el de establecer las condiciones que debe cumplir el sistema de tierras (Malla Principal) para asegurar el funcionamiento confiable de los equipos instalados en las oficinas CESI, en Gómez Palacio, Durango; así como la seguridad al personal que opera dentro de las oficinas, minimizando la diferencia de potencial entre todos los objetos metálicos y brindando protecciones de equipamiento contra tensiones peligrosas y descargas eléctricas.

Concretamente el sistema de puesta a tierra provee un camino de baja impedancia para derivar a tierra corrientes de falla y disturbios presentes en las oficinas.

3. CRITERIOS DE DISEÑO.

Para la elaboración de esta memoria de cálculo se han tomado en cuenta los siguientes criterios, dichos criterios utilizados aseguran que las personas dentro de la oficina no estarán expuestas a diferencias de potencial que pongan en peligro su vida, en caso de circulación de corrientes de falla a tierra o descargas atmosféricas:

- a. **Red General.** Se debe diseñar una red de conexión a tierra principal, tomando en consideración el área total del complejo en general, así como la Subestación Eléctrica ubicada en el nivel 1 y conectarlas a la red de tierras general a través de registros, los cuales forman parte del alcance de suministro, por lo que se debe localizar los puntos de terminales para llevar a cabo esta interconexión. La red general estará formada por cable de cobre desnudo calibre 4/0 AWG como mínimo (Red Primaria), considerando cable calibre 1/0 AWG como mínimo (Red Secundaria) para la conexión a tierra de las bases de los equipos, incluyendo también, varillas tipo copperweld (electrodos), soldaduras exotérmicas para conexiones fijas, y mecánicas para equipos móviles, enterrado a poca profundidad del nivel del suelo natural, el mínimo a 70 cm.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 4 de 23	Rev. 1

- b. **Red Preferencial** (Enunciativo). Se debe considerar una red preferencial de tierra y conectarla a la red general, esto de acuerdo a lo indicado en la última edición de las normas IEEE 1100 y IEEE 1050.

Debe entenderse por “Red preferencial de Tierra”, a la red exclusiva para tierra del equipo electrónico de los nuevos sistemas de control, computo, comunicación y sistema de excitación, a la que solo se debe conectarse tarjetas y/o equipo electrónico. Las estructuras o gabinetes de estos sistemas, se deben conectar a la red general de tierras de la Central.

Si la tecnología empleada no contempla el uso de la red preferencial para aterrizar equipo electrónico, se permite que este sea conectado a la red general de tierra, siempre y cuando las conexiones se realicen a través de filtros que impidan que la corriente de cortocircuito de la red general pudiera ingresar al equipo electrónico y/o gradientes de potencial peligrosos.

- c. **Valor de la Resistividad.** Se tiene un modelo de resistividad de:

N	resistividad
1	40-250ohms-m
2	15-50ohms-m
3	2-5ohms-m

- e. **Resistencia de la red de tierras.** El valor de la resistencia a tierra de la red instalada debe tener un valor menor de acuerdo a lo establecido en la NOM-001-SEDE-2012, ver tabla 921-25(b).-Resistencia a tierra del sistema.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 5 de 23 Rev. 1

Tabla 921-25 (b).- Resistencia a tierra del sistema.

Resistencia (ohms)	Tensión máxima (kV)	Capacidad máxima del transformador (kVA)
5	mayor que 35	mayor que 250
10	35	mayor que 250
25	35	250

- g. **Recomendación de ANSI / IEEE Std. 80-2000:** Mantener los potenciales de paso y contacto en el área de la Central por abajo de los valores máximos tolerables por una persona con peso de 70 kg.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 6 de 23 Rev. 1

4. NORMAS Y CÓDIGOS DE REFERENCIA

Para el desarrollo de los cálculos del sistema de tierras se tomaron en consideración los siguientes documentos normativos:

- a. ANSI / IEEE Std. 80 - 2000 Guide for safety in AC substation grounding.
- b. IEEE Std. 142-1991 Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems.
- c. NOM-001-SEDE-2012 Norma Oficial Mexicana, “Instalaciones eléctricas (Utilización)”
- d. NRF-011-CFE-2004 Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas.

5. DEFINICIONES.

Resistividad del suelo: La resistividad representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ohm-m) u (Ohm-cm), es inversa a la conductividad.

Resistividad eléctrica (ρ): Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1 m x 1 m x 1 m, medida entre dos caras opuestas.

La resistividad del suelo varía con el tipo de suelo y también con el contenido de humedad; puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierra. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 7 de 23 Rev. 1

Resistividad aparente: Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de cuatro (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial, sólo es representativo para un punto de la característica del suelo estratificado.

Medición de la resistividad del suelo: La resistividad del suelo se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad de la roca, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras.

La resistividad del suelo es de su importancia para el diseño de la red de tierra y la única forma de conocerla con exactitud es mediante la medición en campo. Antes de iniciar el diseño de la red de tierra se debe conocer el valor de la resistividad del suelo, si no se conoce se puede emplear el método de Wanner.

Nota: En lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

Valores de resistividad del suelo: De acuerdo a la Tabla No. 8 del ANSI / IEEE Std. 80-2000 se designan los valores siguientes:

Tipo de suelo	Resistividad promedio en ohm-m
Orgánico húmedo (pantanos): Muy corrosivo	10
Húmedo (tierra vegetal, arena húmeda): Corrosivo	100
Seco (arena seca, grava): Modernamente corrosivo	1000
Rocoso: Poco corrosivo	10000 ó mayor

Tensión de paso (Ep): Es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie de la tierra separados por una distancia de un paso; se asume de un (1) metro, en la dirección del máximo gradiente de potencial. Esta diferencia de potencial puede ser peligrosa si la corriente que provoca fluye a través de la tierra o material sobre el cual se encuentra un trabajador, particularmente bajo condiciones de falla.

Tensión de contacto (Ec): Es la diferencia de potencial que existe entre una estructura metálica y un punto en la superficie de la tierra, separado por una distancia igual a la máxima distancia de alcance horizontal de un ser humano, aproximadamente un (1) metro.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 8 de 23	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

Elevación de potencial de tierra (GPR): Es el máximo potencial eléctrico que una malla a tierra puede alcanzar con relación a un punto de tierra distante, asumiendo que esté el potencial de la tierra remota. Cuando se produzca un cortocircuito monofásico en el sistema con el valor máximo de intensidad de falla, experimentará una elevación de su potencial, respecto al potencial de referencia (0 V). Este potencial GPR es igual a la corriente máxima de falla a tierra de la malla multiplicada por la resistencia de puesta a tierra de la malla.

Tierra remota: También denominada: Tierra de Referencia; es el lugar o la zona de mínima resistencia, más próxima del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de la cual se le atribuye por convención el potencial cero (0 V).

Malla de puesta a tierra: Sistema de electrodos de tierra horizontal consistente en un número de conductores desnudos interconectada y enterrada en el suelo, los que proporcionan una tierra electrotécnica común para los dispositivos eléctricos o las estructuras metálicas, usualmente en un lugar específico.

NOTA: Las mallas enterradas horizontalmente cerca de la superficie del suelo son efectivas para controlar los gradientes de potencial superficiales. Una malla típica está suplementada comúnmente por un número de electrodos de tierra verticales y puede estar conectada adicionalmente a electrodos de tierra auxiliares para disminuir su resistencia respecto a una tierra remota.

Potencial Eléctrico: Es la diferencia de potencial entre un punto y alguna superficie equipotencial que generalmente es la superficie del suelo, la cual es seleccionada arbitrariamente como potencial cero o tierra remota. Un punto en el cual tiene un potencial más alto que cero (0 V) se llama potencial positivo (+) y en caso contrario potencial negativo (-).

Corriente máxima de falla: Es la corriente de cortocircuito monofásica máxima de fase a tierra, la cual interviene en forma decisiva el valor de la resistencia interpuesta en el cortocircuito.

Resistencia de la malla: Es el valor de la resistencia (dada en Ohms) de la malla enterrada.

6. DESARROLLO DE CÁLCULO.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO Nº:	
	Página 9 de 23	Rev. 1

Datos técnicos.

Concepto	Valor
Temperatura ambiente, en °C. (Máxima de verano)	30°C
Duración de la corriente de falla, en segundos.	0.5 s.
Resistividad del terreno, en Ohm-m.	$\rho = 15.0 \text{ Ohm-m.}$
*Corriente de falla monofásica, fase a tierra, considerando crecimiento del sistema; en A. (I)	41000 A.
Resistividad superficial, concreto con espesor de 10 cm (h_s).	$P_s = 3000 \text{ Ohm-m.}$
Profundidad de la malla, en metros.	0.7 m.
Electrodos copperweld verticales. Con diámetro de 5/8" (0.0159 m = d)	4 piezas.
Dimensiones de la malla propuesta, en metros. (Largo por ancho)	5 m x 10 m.
* Se considera que en el futuro se incremente el valor de la corriente de falla a tierra, por lo que el factor de crecimiento es de 1.5. El tiempo de duración de la falla se considera de 0.5 segundos por lo que el factor decremental correspondiente es de 1.0.	

Descripción del diseño.

La malla principal de puesta a tierra estará compuesta por los siguientes elementos:

- Conductores principales ubicados en la zona de trabajo; formando retículas cuadradas de 1.25 m de largo x 1.25 m de ancho y que involucran el área principal de la Subestación eléctrica.
- La malla principal diseñada será ampliada en el resto de la central, con lazos perimetrales a edificios, estructuras y cimentaciones de equipos.
- La malla de tierras de los equipos electrónicos se conectará con la malla de tierras principal, con lo cual se reducirá la resistencia de la red de tierras general.
- Todos los electrodos estarán unidos entre sí en múltiples puntos de la malla principal. El área protegida contra las tensiones de paso y contacto será la zona de trabajo.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 10 de 23 Rev. 1

- La malla principal de puesta a tierra estará formada por conductor de cobre desnudo, semiduro, calibre 4/0 AWG (107.2 mm²) como mínimo, de acuerdo a lo establecido en el ANSI / IEEE Std. 80-2000. Todas las uniones de los conductores deberán realizarse por medio de soldadura exotérmica (Cadweld).
- La malla de tierra estará equipada con conductores horizontales y verticales (varillas tipo copperweld), de 5/8" (19 mm) de diámetro y 3.0 m de longitud; también se deberán considerar electrodos para:
 - a. Conexiones con pararrayos, elementos de protección contra sobretensiones atmosféricas; puntos de conexión con otras mallas de tierra (Subestación); conexiones con neutro, transformadores, etc.
 - b. Sistemas especiales, red preferencial; para las tierras electrónicas como protección de los equipos electrónicos computacionales, de comunicación, cuartos de máquinas para albercas, equipos mecánicos para los cuartos de máquinas.

Sección del conductor a utilizar.

De acuerdo a la fórmula (40) indicada en el estándar ANSI / IEEE Std. 80-2000 para la determinación del calibre mínimo de conductores se obtiene la sección transversal mínima del conductor que puede transportar la corriente de falla monofásica sin sufrir degradaciones.

$$A_{\text{mm}^2} = \frac{I_g}{\sqrt{\frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \cdot \ln \cdot \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}}$$

Dónde:

- I_g Corriente de cortocircuito monofásica, en kilo-Amperes.
- A Sección transversal de cobre en milímetros cuadrados.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 11 de 23 Rev. 1

T_m	Máxima temperatura permisible, en °C.
T_a	Temperatura ambiente, en °C.
T_r en °C.	Temperatura de referencia para las constantes de materiales,
α_r	Es el coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de referencia en 1/°C.
ρ_r	Resistividad del conductor de la malla de tierra a la temperatura de referencia en $\mu\Omega\text{-cm}$.
K_0	Es un factor, que equivale: $1/\alpha_0$ ó $(1/\alpha_r) - T_r$, en °C.
t_c	Tiempo en que circula la corriente, en segundos,
TCAP	Factor de capacidad térmica indicado en la Tabla 1 del estándar ANSI / IEEE Std. 80-2000, en $J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	
	DOCUMENTO N°:	Rev. 1
	Página 12 de 23	

Esta fórmula evalúa la capacidad de conducción de corriente de cualquier conductor donde las constantes del material son conocidas o pueden ser determinadas por cálculo.

Considerando que el material del conductor de cobre que se utilizará, son conductores de cobre comercial con 97 % de conductividad, las constantes de los conductores serán:

I_g	6.56 kA.
T_m	1084°C.
T_a	30°C.
T_r	20°C.
α_r	0.00381 1/°C.
ρ_r	1.78 $\mu\Omega - \text{cm}$.
K_0	242 a 0°C.
t_c	0.5 segundos.
TCAP	3.42 J/(cm ³ · °C).

Las uniones de la malla serán realizadas por medio de conexiones soldables exotérmicas. Este tipo de uniones forma una íntima unión entre los conductores y el material de la unión que tienen la misma temperatura de fusión. Por lo tanto, todas las conexiones y el conductor pueden ser consideradas como un conductor homogéneo.

Por lo tanto el área mínima calculada del conductor es, sustituyendo valores:

$$A_{\text{mm}^2} = \frac{6.56}{\sqrt{\frac{3.42 \cdot 10^{-4}}{0.5 \cdot 0.00381 \cdot 1.78} \cdot \ln \cdot \left(\frac{242 + 1084}{242 + 30} \right)}} = \frac{6.56}{\sqrt{0.158298}} = 16.41 \text{ mm}^2$$

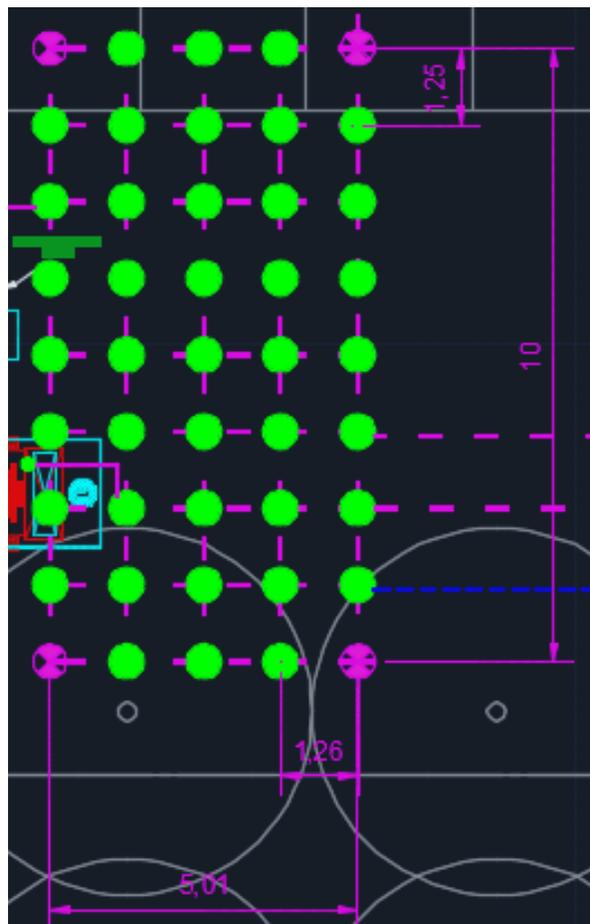
El conductor comercial correspondiente al área de 16.41 mm² es un conductor calibre 4 AWG.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO Nº:	
	Página 13 de 23	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

Se utilizará el calibre 4/0 AWG con una sección transversal de 107.2 mm²; con la finalidad de garantizar que el área del conductor no se verá afectada significativamente por efecto de la corrosión, dónde el calibre principal de la malla es 4/0 AWG. Las derivaciones hacia las mallas y sistemas del edificio se realizarán con el calibre 1/0 awg, ya que el calibre calculado (2 AWG) y las derivaciones hacia los equipos serán con calibre 2 AWG.

Malla propuesta a utilizar.

El arreglo de la malla propuesta, consiste en 5 conductores paralelos al eje "X" y 9 conductores paralelos al eje "Y". Se tienen 4 electrodos de tierra, distribuidos simétricamente en el perímetro de la Central, como se muestra a continuación:



CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 14 de 23 Rev. 1

Determinación de la longitud de los conductores.

$$L_T = L_c + 1.15 L_R$$

Donde:

L_c Longitud de conductores (horizontales) enterrados en la malla.

L_R Longitud de conductores (verticales) de las varillas de tierra en la malla.

$$L_c = 10 \times 5 = 50 \text{ m.}$$

$$L_R = \text{No. de conductores verticales: } 10 \times 5 = 50 \text{ m.}$$

$$L_T = 50 + 1.15 \times 50 = 107.5 \text{ m}$$

Determinación de la resistencia de la malla.

La resistencia de la malla se conoce por medio de la fórmula 52 del ANSI /IEEE Std. 80-1982:

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Donde:

h Es la profundidad de la malla = 0.7 m

A Es el área total de la malla = $10 \times 5 = 50 \text{ m}^2$

$$R_g = 15 \cdot \left[\frac{1}{107.5} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 50}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + (0.7) \cdot \sqrt{20/50}} \right) \right]$$

$$R_g = 15 \cdot [0.0051679 + 0.02236 \cdot (1 + 0.761585)] = 15 \cdot 0.041112 = 0.94265 \Omega$$

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 15 de 23 Rev. 1

$$R_g = 0.94265 \, \Omega < 5.00 \, \Omega$$

Cálculo de la tensión de malla.

$$E_{TM} = I_g \times R_g = 6.56 \, \text{kA} \times 0.942659 = 6183.84 \text{V}$$

Cálculo de los potenciales tolerables de paso y de contacto.

Potencial de paso. Para un espesor de concreto (h_s) de 0.20 m, se tendrá un valor de resistividad de 3000 Ω -m y para el terreno una resistividad de 15 Ω -m.

De acuerdo a la Ec. 30 del Std. 80, se tiene que:

$$E_{S70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s}$$

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

Cálculo de C_s :

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (\text{Ec. 21}) \text{ ANSI / IEEE Std. 80-2000}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno = 15 Ω -m

ρ_s = Resistividad del concreto = 3000 Ω -m

CESI GOMEZ PALACIO

Descripción:

**MEMORIA DE CÁLCULO
SISTEMA DE TIERRAS**

DOCUMENTO N°:

Página 16 de 23

Rev. 1

$$K = \frac{15 - 3000}{15 + 3000} = \frac{-2985}{3015} = -0.99004$$

h_s = Espesor de la capa superficial = 0.20 m

CESI GOMEZ PALACIO

Descripción:

**MEMORIA DE CÁLCULO
SISTEMA DE TIERRAS**

DOCUMENTO Nº:

Página 17 de 23

Rev. 1

Con estos valores de “K” y “h_s”, por medio de la Figura 11 y la Ec. 27 del ANSI / IEEE Std. 80-2000.

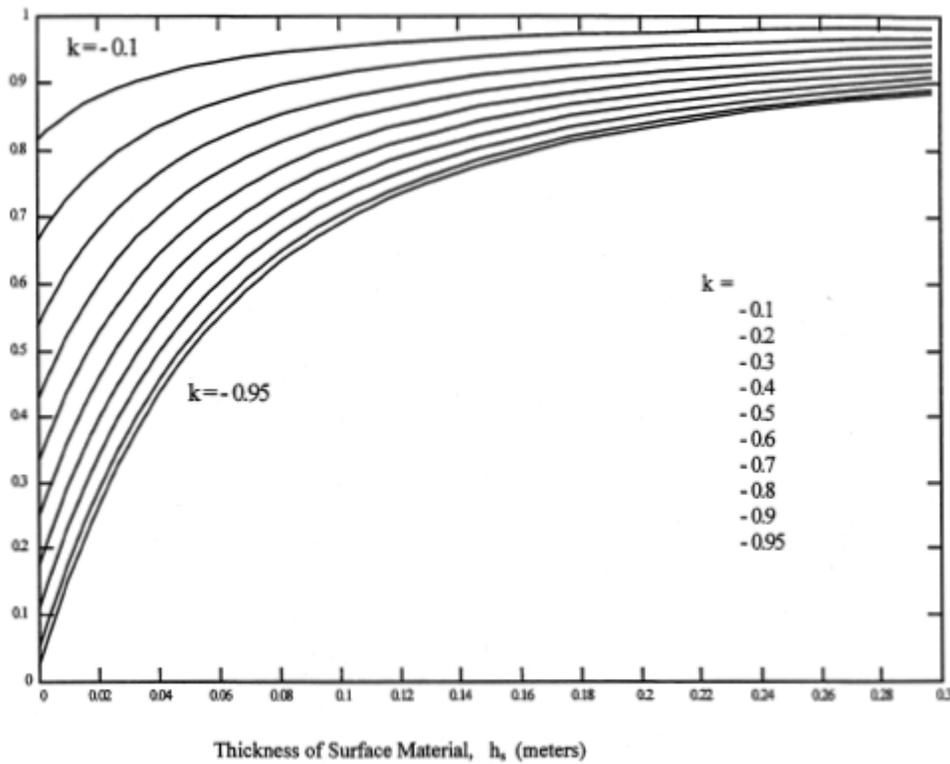


Figure 11—C_s versus h_s

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{15}{3000} \right)}{2 \cdot 0.2 + 0.09} = 1 - \frac{0.8955}{0.49} = 0.8275$$

$$C_s = 0.8275$$

Cálculando la tensión de paso, se tiene que:

$$E_{S70} = [1000 + 6 \cdot (0.8275) \cdot (3000)] \cdot 0.157 / \sqrt{0.5} = 3529.2 \text{ [V]}$$

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 18 de 23 Rev. 1

Potencial de contacto. El potencial de contacto, se obtiene mediante la Ec. 33 del ANSI / IEEE Std. 80-2000, la cual es la siguiente:

$$E_{T70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s}$$

Sustituyendo valores, se tiene que:

$$E_{T70} = [1000 + 1.5 \cdot (0.8275) \cdot (3000)] \cdot 0.157 / \sqrt{0.5} = 1048.82 \text{ [V]}$$

Comparando valores, se tiene que:

$$E_{TM} > E_{T70}$$

$$3529.2 > 1048.82$$

Por tanto, se necesita calcular lo siguiente:

Determinación de los coeficientes Ki, Km y Ks de la malla.

Para el cálculo de las tensiones de paso y contacto se tendrá en cuenta sólo el conductor reticulado en forma homogénea; esto es, la malla extendida en toda el área (100 m²).

Atendiendo las características geométricas de la malla, se calculan los siguientes coeficientes:

Cálculo del factor de corrección (Ki) por geometría de la malla, de acuerdo a la Ec. 89:

$$K_i = 0.644 + 0.148 (n)$$

Dónde:

n = número efectivo de conductores en cualquier dirección

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

$$n_a = (2 \cdot L_c) / L_p$$

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO Nº:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 19 de 23 Rev. 1

Dónde:

L_c = Longitud de conductores horizontalmente enterrados = 95 m

L_p = Longitud de conductores en el perímetro de la malla = 2 x 5 + 2 x 10 = 30 m

$$n_a = (2 \times 95) / 30 = 6.33$$

$$n_b = n_c = n_d = 1.0$$

$$n = 6.33 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 6.33$$

Sustituyendo valores en la ecuación, tenemos:

$$K_i = 0.644 + 0.148(6.33) = 0.644 + 0.592 = \mathbf{1.58}$$

Cálculo del factor geométrico (K_m) para la tensión de contacto de la malla (Ec. 81).

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

Dónde:

- D** Espaciamiento entre conductores en paralelo: D = 1.25 m.
- d** Diámetro del conductor de 4/0 AWG de la malla en metros: d = 0.01168.
- K_{ii}** Para mallas con conductores verticales en el perímetro = 1.0.

Quando la malla no está conformada con conductores verticales (Varillas) en el perímetro o en las esquinas y en su interior, entonces K_{ii} es igual a:

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO Nº:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 20 de 23 Rev. 1

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt{1 + \frac{0.7}{1.0}} = 1.30 \text{ m}$$

Dónde:

h = Profundidad a la cual está enterrada la malla en m. $h = 0.7 \text{ m}$.

h_o = Profundidad de referencia de la malla y es igual a 1.0 m.

Entonces:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \cdot \left[\frac{1.25^2}{16 \cdot 0.8 \cdot 0.01168} + \frac{(3+2 \cdot 0.7)^2}{8 \cdot 3 \cdot 0.01168} - \frac{0.7}{4 \cdot 0.01168} \right] + \frac{1.0}{1.3416} \cdot \ln \cdot \left(\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot 4 - 1)} \right)$$

$$K_m = 0.1592 \cdot \ln \cdot [60.199 + 75.4851 - 17.123] + 0.7453 \cdot -1.3858 = 0.1592 \cdot \ln(118.5611) - 0.6405$$

$$K_m = 0.12469 \text{ m}$$

Cálculo del factor geométrico (K_s) para la tensión de paso (Ec. 94).

Para profundidades comprendidas entre 0.25 m y 2.5 m. ($0.25 < h < 2.5 \text{ m}$)

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 0.7} + \frac{1}{1.25+0.7} + \frac{1}{1.25} (1 - 0.5^{4-2}) \right] = 0.32 \cdot [0.625 + 0.2631 + 0.04 \cdot 0.9375] = 0.5815$$

Determinación de las tensiones reales de paso y contacto.

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO Nº:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 21 de 23 Rev. 1

Se calcularán las tensiones de paso (**Ep**) y contacto (**Ec**) de la malla de puesta a tierra atendiendo a los coeficientes determinados anteriormente, de acuerdo con el estándar ANSI / IEEE 80-2000.

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_g}{L_s}$$

Dónde:

Ls Longitud efectiva de los conductores enterrados, de acuerdo a la ecuación No. 93, del ANSI / IEEE Std. 80-2000.

$$L_s = 0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R = 0.75 (120) + 0.85 (12) = 100.2 \text{ m}$$

Sustituyendo valores en la ecuación, tenemos:

$$E_s = \frac{15 \cdot 0.12469 \cdot 1.236 \cdot 6560}{100.2} = \frac{15165.09}{100.2} = 151.34 \text{ V}$$

El valor de tensión de paso es 151.34 V de la malla de tierra, es menor que el valor de tensión de paso máximo admisible para personas de 70 Kg. de peso (3529.2 V).

Por lo tanto el valor de tensión real de paso es correcto. Calculando la tensión de malla (Ec. 80):

$$E_M = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_g}{L_m}$$

Dónde:

Lm es la longitud efectiva del conductor enterrado.

Calculando Lm mediante la fórmula 91 del ANSI / IEEE Std. 80-2000, se tiene que:

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción:	DOCUMENTO Nº:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 22 de 23 Rev. 1

$$L_m = L_c + \left(1.55 + 1.22 \cdot \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \cdot L_R$$

Dónde:

L_r Longitud de un solo electrodo vertical de la malla, en m = 3.0 m.

L_x Longitud máxima de la malla en el eje "X", en m = 10.0 m.

L_y Longitud máxima de la malla en el eje "Y", en m = 10.0 m.

Por tanto:

$$L_m = 120 + \left(1.55 + 1.22 \cdot \frac{3.0}{\sqrt{5^2 + 10^2}} \right) \cdot 12 = 126 + 1.808 \cdot 12 = 142.5 \text{ m}$$

Sustituyendo valores y calculando la tensión de malla, se tiene que:

$$E_M = \frac{15 \cdot 0.12469 \cdot 1.236 \cdot 6560}{142.5} = \frac{15165.09}{142.5} = 106.42 \text{ V}$$

El valor de tensión de malla es 106.42 V y es menor que el valor de tensión de contacto máximo admisible para personas de 70 Kg. de peso (1048.82 V).

7. CONCLUSIONES.

CRITERIOS DE DISEÑO	RESULTADOS OBTENIDOS	CONCLUSIONES
Resistencia de la malla menor o igual a 5 Ohms.	La resistencia de la malla es de 0.0668354 Ohms.	Cumple
El potencial de contacto en el área de la Central debe ser menor al máximo potencial de malla	En el perfil de potenciales y en los gradientes de potencial de malla se observa que no existen	Cumple

CESI GOMEZ PALACIO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 23 de 23	Rev. 1

permisible, de 1048.82 Volts.	potenciales de contacto mayores al máximo potencial de malla permitido (106.42 Volts).	
El potencial de paso en el área de la Central debe ser menor al máximo potencial de paso permisible de 3529.2 Volts.	En el perfil de potenciales se observa que no existen potenciales de paso mayores al máximo potencial de paso permitido (151.34 Volts).	Cumple

Resumen:

Longitud total de conductores calibre 4/0 AWG kCM = $10 \times 5 + 9 \times 5 \text{ m} = 95 \text{ m}$.

Longitud total de electrodos de 5/8" = 4 piezas ($3 \times 4 = 12 \text{ m}$).

Los resultados obtenidos cumplen con los criterios de diseño previamente establecidos, por lo que se concluye que el diseño de la red de tierras es correcto.

Actualización:

En junta de revisión con personal de Infonavit se llegó al acuerdo de optimizar las dimensiones de la malla general del sistema de puesta a tierra limitándola al espacio ocupado por la subestación, ello se justifica mediante la conexión en al menos 2 puntos de la estructura metálica por medio de cable desnudo 4/0 AWG, utilizando dicha estructura como parte de la malla de tierras, mejorando así la resistividad final de la malla.

Final del
Documento.