



Memoria de Cálculo del Sistema de Tierras.

TU-E-MC-IE-02

FEBRERO 2018

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 2 de 19	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 TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 3 de 19	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 CESI, en Tula, Hidalgo. 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 Tula, Hidalgo; 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 consideración el área total del complejo en general, así como la Subestación Eléctrica ubi 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 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 conexión a tierra de las bases de los equipos, incluyendo también, varillas tipo copper (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.
- 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,

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 4 de 19	Rev. 1

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. **Sistema de Pararrayos** (Enunciativo). Para el sistema contra descargas atmosféricas será necesario conectar a la red general de tierras los pararrayos por medio de un conductor de cobre desnudo temple suave de calibre 2/0 AWG.

Se debe incluir copias de los certificados de las pruebas prototipo de los equipos que componen éste sistema, realizados por laboratorios reconocidos internacionalmente.

- d. **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 921-2! Resistencia a tierra del sistema.

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 TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 5 de 19	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; p tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no puede 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.

Resistividad aparente: Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo un esquema geométrico especificado por el método de cuatro (4) electrodos, aplicado con corrientes 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.

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 6 de 19	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA 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 punto en la superficie de la tierra, separado por una distancia igual a la máxima distancia de alc horizontal de un ser humano, aproximadamente un (1) metro.

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

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 7 de 19	Rev. 1

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.

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 5 m.

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	Página 8 de 19 Rev. 1

* Se considera que en el futuro se incrementa 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.
- 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 exotér (Cadweld).
- La malla de tierra estará equipada con conductores horizontales y verticales (varillas 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 neutros, 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.

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 9 de 19	Rev. 1

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.
T_m	Máxima temperatura permisible, en °C.
T_a	Temperatura ambiente, en °C.
T_r	Temperatura de referencia para las constantes de materiales, en °C.
α_r	Es el coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de referencia 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 $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 10 de 19	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

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 considerados como un conductor homogéneo.

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

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

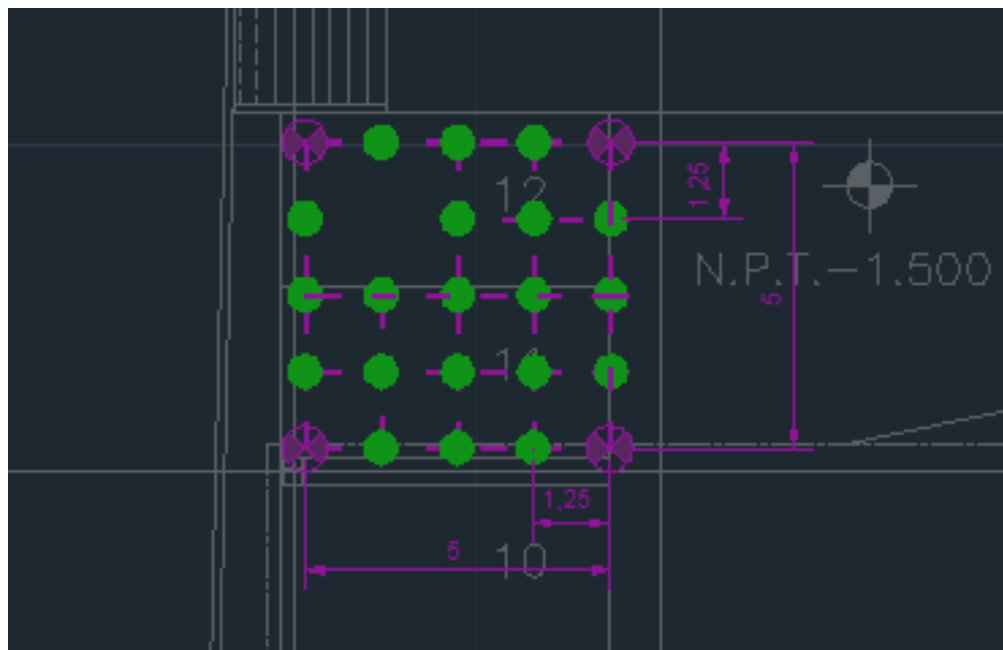
El conductor comercial correspondiente al área de 16.41 mm² es un conductor calibre 4 AWG.

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 11 de 19	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

Se utilizará el calibre 4/0 AWG con una sección transversal de 107.2 mm^2 ; 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 TULA, HIDALGO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 12 de 19	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.

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

$$L_R = \text{No. de conductores verticales: } 4 \times 3 = 12 \text{ m.}$$

$$L_T = 50 + 1.15 \times 12 = 63.8 \text{ m}$$

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 = 5 x 5 = 25 m²

$$R_g = 15 \cdot \left[\frac{1}{63.8} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 25}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + (0.7) \cdot \sqrt{20/25}} \right) \right]$$

$$R_g = 15 \cdot [0.015673 + 0.164418 \cdot (1 + 0.087688)] = 15 \cdot 0.195882 = 2.938242 \Omega$$

$$R_g = 2.938242 \Omega < 5.00 \Omega$$

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 13 de 19	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

Cálculo de la tensión de malla.

$$E_{TM} = I_g \times R_g = 6.56 \text{ kA} \times 2.938242 = 19274.84V$$

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 :

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

Donde:

ρ = Resistividad del terreno = 15 Ω -m

ρ_s = Resistividad del concreto = 3000 Ω -m

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

h_s = Espesor de la capa superficial = 0.20 m

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 14 de 19	Rev. 1
MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS		

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

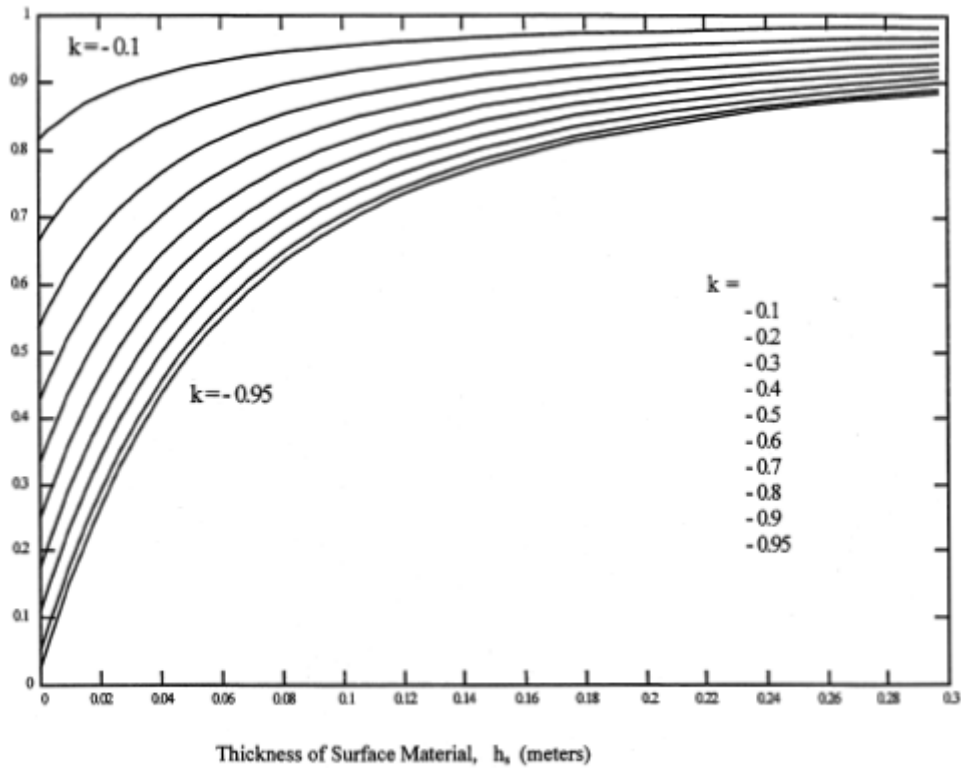


Figure 11—C_s versus h_s

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

$$C_s = 0.8275$$

Cálculando la tensión de paso, se tiene que:

$$E_{570} = [1000 + 6 \cdot (0.8275) \cdot (3000)] \cdot 0.157 / \sqrt{0.5} = 3529.2 \text{ [V]}$$

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

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 15 de 19	Rev. 1

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

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 K_i , K_m y K_s 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 (K_i) 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

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

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

Dónde:

L_c = Longitud de conductores horizontalmente enterrados = 50 m

L_p = Longitud de conductores en el perímetro de la malla = 2 x 5 + 2 x 5 = 20 m

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 16 de 19	Rev. 1

$$n_a = (2 \times 50)/20 = 5.0$$

$$n_b = n_c = n_d = 1.0$$

$$n = 5.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 5.0$$

Sustituyendo valores en la ecuación, tenemos:

$$K_i = 0.644 + 0.148(5.0) = 0.644 + 0.592 = \mathbf{1.384}$$

Cálculo del factor geométrico (Km) 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.
- Kii** Para mallas con conductores verticales en el perímetro = 1.0.

Cuando la malla no está conformada con conductores verticales (Varillas) en el perímetro o e esquinas y en su interior, entonces Kii es igual a:

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

Dónde:

h = Profundidad a la cual está enterrada la malla en m. h= 0.7 m.

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

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción:	DOCUMENTO N°:	
	Página 17 de 19	Rev. 1

**MEMORIA DE CÁLCULO
SISTEMA DE TIERRAS**

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 (Ks) para la tensión de paso (Ec. 94).

Para profundidades comprendidas entre 0.25 m y 2.5 m. (0.25 < h < 2.5 m)

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

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

Determinación de las tensiones reales de paso y contacto.

Se calcularán las tensiones de paso (**Ep**) y contacto (**Ec**) de la malla de puesta a tierra atendiendo 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:

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 18 de 19	Rev. 1

L_s 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:

L_m es la longitud efectiva del conductor enterrado.

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

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

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:

CESI TULA, HIDALGO		
Descripción: MEMORIA DE CÁLCULO SISTEMA DE TIERRAS	DOCUMENTO N°:	
	Página 19 de 19	Rev. 1

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

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 0.0938242 Ohms.	Cumple
El potencial de contacto en el área de la Central debe ser menor al máximo potencial de malla permisible, de 1048.82 Volts.	En el perfil de potenciales y en los gradientes de potencial de malla se observa que no existen potenciales de contacto mayores al máximo potencial de malla permitido (106.42 Volts).	Cumple
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 kcmil = 5x5 + 5x5 m = 50 m.

Longitud total de electrodos de 5/8" = 4 piezas (3 x 4 = 12 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.

Final del Documento.