



## 9. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

### 9.1 CONSIDERACIONES TECNICAS

Para el diseño de la red de tierras de esta subestación se consideraron los valores de corriente de corto circuito proporcionado por CFE (PUNTO No 6. PARAMETROS ELECTRICOS DE LA OBRA), así como los valores de resistividad del terreno que se obtuvieron al realizar las mediciones en el área de la subestación (VER ANEXO 1 MEMORIA DE CALCULO).

Se consideró la resistividad del terreno, de: **62.71  $\Omega$ -m (VER ANEXO 1)**

Para efectos de cálculo se utilizará una capa superficial de grava, de: **5000  $\Omega$ -m (VER ANEXO 1)**

La corriente de Corto Circuito máxima en el sistema, de acuerdo a las especificaciones particulares de este proyecto:  **$I_0 = 25 \text{ kA}$  (ITEM 7. PARAMETROS ELECTRICOS DE LA OBRA)**

### 9.2. CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR DE LA REJILLA PARA TIERRA

Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra y de la rejilla para tierra, la corriente de falla  $3I_0$  debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo  $t_c$  deber ser el tiempo máximo de liberación de la falla, incluyendo el tiempo de la protección de respaldo. Para calcular la sección transversal del conductor se debe considerar la corriente de falla de fase a tierra o dos fases a tierra la que resulte más severa. Ya que la corriente de falla  $3I_0$  debe ser la máxima corriente futura.

$I_0$  = Corriente de Falla RCM en KA (Debe considerarse el incremento de este valor a futuro)

$I_0 = 25.00 \text{ kA}$

$C_p$  = Factor de proyección que toma en cuenta los incrementos relativos a lo largo de la vida útil.

$C_p = 1.05$

$I$  = Corriente máxima RCM en kA

$I = 25.00 \times 1.05 = 26.25 \text{ kA}$

Para el cálculo de la sección transversal se aplicó la siguiente ecuación:

$$A_{mm^2} = I \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}}}$$

ECUACION. 1 (VER ANEXO 1)



Dónde:

I = Corriente máxima RCM en KA = **26.25 KA**

$T_m$  = Temperatura máxima permisible en °C = **1084 °C**

$T_a$  = Temperatura ambiente °C = **36 °C**

$T_r$  = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C = **20 °C**

$\alpha_0$  = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C = **0.006 1/°C**

$\alpha_r$  = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia  $T_r$  en 1/°C = **0.00381 1/°C**

$\rho_r$  = Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia  $T_r$  en  $\mu\Omega\text{-cm}$  = **1.78  $\mu\Omega\text{-cm}$**

$t_c$  = Tiempo de duración de la corriente en segundos = **1 seg**

TCAP = Factor de capacidad térmica por unidad de volumen en  $J/(\text{cm}^3/^\circ\text{C})$  = **3.42  $J/(\text{cm}^3/^\circ\text{C})$**

$K_o = 1/\alpha_0$  o  $(1/\alpha_r) - T_r$  en °C = **242.00**

Al sustituir los datos anteriores, tenemos el siguiente resultado:

$A_{mm^2} = 93.52 \text{ mm}^2$

LO ANTERIOR NOS MUESTRA QUE BASTA UNA SECCION TRANSVERSAL DE 93.52 mm<sup>2</sup> QUE CUENTA CON LA SECCION SUFICIENTE PARA DRENAR A TIERRA LA CORRIENTE DE FALLA SIN QUE EXISTA DAÑO POR ELEVACION DE TEMPERATURA EN LOS CONDUCTORES SIEMPRE QUE LAS PROTECCIONES ELIMINEN LA FALLA EN UN TIEMPO NO MAYOR A 1 SEGUNDO

POR LO TANTO SE USARA UN CALIBRE 4/0 AWG PARA LA MALLA PRINCIPAL (EL CUAL TIENE UNA SECCION TRANSVERSAL DE 107 mm<sup>2</sup>)

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor $\alpha$ a 20 °C	$K_o$ al 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusión $T_m$ (°C)	$\rho_r$ 20 °C ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	Factor de capacidad térmica por unidad de volumen (d) TCAP [ $J/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$ ]
Cobre recocido suave – inmersión	100.0	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre comercial inmersión – dura	97.0	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Cobre revestido alambre de acero	40.0	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Cable revestido alambre de acero	30.0	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Cable revestido barra de acero	20.0	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Acero 1020	10.0	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Acero revestido barra de acero	9.8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Zinc bañado barra de acero	8.6	0,00320	293	419	20,10	3,93
Acero inoxidable 304	2.4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

TABLA 4 CONSTANTES DE MATERIALES



### 9.3. DETERMINACION DE LA CORRIENTE MAXIMA DE LA REJILLA IG

La corriente simétrica de rejilla es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la rejilla para tierra hacia el terreno que la rodea

$$I_g = S_f * I_f$$

ECUACION. 3 (VER ANEXO 1)

$$I_f = 3I_0$$

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0}$$

ECUACION. 4 (VER ANEXO 1)

Dónde:

$I_g$  = Corriente simétrica de rejilla en A.

$I_f$  = Corriente simétrica de falla a tierra en A = **26.25 KA**

$S_f$  = Factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla con la parte de esta corriente que fluye de la rejilla hacia el terreno.

$S_f$  = **0.48 (VER ANEXO 1)**

Por lo tanto:

$$I_g = \mathbf{12.60 KA}$$

La corriente que puede circular en una rejilla para tierra en casos de falla, se conoce como “corriente máxima de rejilla”, la cual se determina con:

$$I_G = D_f * I_g$$

ECUACION. 5 ((VER ANEXO 1)

Dónde:

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

ECUACION. 6 (VER ANEXO 1)



En dónde:

$I_G$  = Corriente máxima de rejilla en A

$I_g$  = Corriente simétrica de rejilla en A.

$D_f$  = Factor de decremento para el tiempo de duración de la falla ( $t_c$ ), que está en función del valor de la relación (X) y de resistencia (R) en el punto de falla. Si el tiempo de duración de la corriente es mayor o igual a 1 s o la relación X/R en el punto de localización de la falla es menor que 5, el factor de decremento puede despreciarse, es decir  $D_f = 1$

$t_f$  = Duración de la falla en segundos = **1 seg**

$T_a$  = constante de tiempo subtransitoria en segundos.

De lo anterior tenemos:

$I_g = 12.60 \text{ KA}$

DEBIDO A QUE EL TIEMPO DE DURACION DE LA CORRIENTE ES IGUAL 1s EL FACTOR DE DECREMENTO PUEDE DESPRECIARSE, ES DECIR  $D_f$  ES IGUAL A 1

$D_f = 1$

Duración de falla $t_f$		Factor de decremento $D_f$			
Segundos	Ciclos A 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

TABLA 5. VALORES TIPICOS DE FACTOR DE DECRECIMIENTO  $D_f$  (VER ANEXO 1)

Por lo tanto:

$I_G = 12.60 \text{ KA}$



#### 9.4. DETERMINACION DE TENSION DE PASO Y TENSION DE CONTACTO MAXIMAS PERMISIBLES POR EL CUERPO HUMANO.

Determinar las tensiones de paso y de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano. El tiempo de exposición de la falla debe ser el máximo tiempo hasta que la falla se libere, normalmente el valor se encuentra en el intervalo de 0,1 a 1,0 s.

La corriente de no-fibrilación de magnitud  $I_B$  está relacionada con la energía absorbida por cuerpo y descrita con la siguiente ecuación

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}}$$

ECUACION. 7 (VER ANEXO 1)

Dónde:

$$K = (S_B)^{1/2}$$

$S_B = 0.0135$  Constante empírica del impacto de energía tolerado, cuando se aplica a un por ciento de la población.

$t_s =$  tiempo máximo de liberación de la falla = 1 s

Por lo tanto:

$$I_B = \mathbf{0.1161895}$$

Las ecuaciones para calcular la tensión de paso y la tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano para personas con peso aproximado de 50 kg son las siguientes

$$E_{PASO} = (1000 + 6C_S\rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

ECUACION. 8 (VER ANEXO 1)

$$E_{CONTACTO} = (1000 + 1.5C_S\rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

ECUACION. 9 (VER ANEXO 1)



Dónde:

$C_s$  = factor de reducción

$\rho_s$  = resistividad de la capa superficial

Para calcular las tensiones correspondientes a personas con un peso aproximado a 70 kg, se utilizan las mismas fórmulas con la salvedad de cambiar la constante 0,116 por 0,157.

Fórmula para determinar el factor de reducción ( $C_s$ ) debido a la corrección realizada por la adición de la capa superficial con resistividad  $\rho_s$

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

**ECUACION.10 (VER ANEXO 1)**

Dónde:

$\rho$  = resistividad del suelo en  $\Omega$ -m

$h_s$  = Espesor de la capa superficial en m

De lo anterior tenemos que:

$$C_s = \mathbf{0.77}$$

Por lo tanto:

$$E_{\text{PASO}} = \mathbf{3,793.71 \text{ volts}}$$

$$E_{\text{CONTACTO}} = \mathbf{1,066.18 \text{ volts}}$$

## **9.5. DISEÑO PRELIMINAR DE LA MALLA DE TIERRA.**

El diseño preliminar debe incluir una Rejilla para tierra la cual está formada por conductores que permitan el acceso a los conductores de puesta a tierra de los equipos y estructuras. La separación inicial estimada de los conductores de la Rejilla para tierra, así como la ubicación de los electrodos verticales (varillas para tierra), deben tener como base la corriente  $I_G$  y el área de la subestación que será puesta a tierra.

En la práctica las rejillas para tierra en las Subestaciones de Comisión Federal de Electricidad se construyen cuadradas o rectangulares.

Para subestaciones convencionales nuevas con tensión de 115 kV en el lado de alta tensión:



- la cuadrícula de la rejilla para tierra será de 8 x 8 m , en toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para el aterrizamiento de la cerca,

Para subestaciones convencionales nuevas con tensiones de 230 y 400 kV en el lado de alta tensión:

- la cuadrícula de la rejilla para tierra será de 10 x 10 m, en toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para la puesta a tierra de la cerca. En un sistema de Tierra de una subestación, el espaciamiento típico entre conductores de la rejilla para tierra puede estar entre 3 y 7 m.

## 9.6 DISPOSICION FISICA

El cable que forma el perímetro exterior de la Rejilla para tierra debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación, con ello se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y en las terminales cercanas.

La rejilla para tierra estará constituida por cables colocados paralela y perpendicularmente, con el espaciamiento requerido conforme al cálculo de su resistencia eléctrica y de las tensiones de paso y contacto considerados en el diseño del sistema de tierra.

Los cables que forman la Rejilla para tierra deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipos para facilitar la puesta a tierra de los mismos.

En cada cruce de conductores de la rejilla para tierra, éstos deben conectarse rígidamente mediante conectores y en donde se haya determinado a electrodos verticales (varillas para tierra).

Las estructuras metálicas de las subestaciones, así como las partes metálicas de equipos, deben estar puestas a tierra conectadas a tierra para evitar accidentes por descargas eléctricas en casos de fallas. Los diferentes niveles de la casa de máquinas deben contar con circuitos cerrados de cable conductor para interconexión a equipos, sistemas o estructuras a tierra. Dichos circuitos deben conectarse directamente al sistema de tierra principal e interconectarse entre sí y estar embebidos en el concreto.

En general la Rejilla para tierra del sistema de tierra debe estar a nivel del tubo de aspiración 0,50m bajo el concreto, en contacto directo con la roca.

Los parámetros físicos del sistema de tierra se basan en limitaciones tanto físicas como económicas presentes en la instalación de la propia Rejilla para tierra. Por ejemplo una limitación física se encuentra en la excavación y relleno de las cepas para enterrar el conductor, por lo que el espaciamiento de la Rejilla para tierra puede ser de 3 m en adelante, los espaciamientos típicos van de 3 a 15 m.



No existe una ecuación para determinar el número óptimo de electrodos verticales (varillas para tierra), sin embargo para que los electrodos verticales (varillas para tierra) tengan una disipación efectiva de corriente, éstos pueden instalarse con una separación mínima de 2 veces su longitud.

Como se mencionó, las fórmulas para el cálculo del sistema de tierra, contemplan profundidades que van de (0,3 – 1,5 m). Es importante enterrar la malla a la profundidad de la capa de menor resistividad y que al mismo tiempo se encuentre dentro del intervalo antes mencionado, tomando en cuenta aspectos económicos relacionados con el material, excavación y relleno.

En la propuesta inicial de la configuración de la rejilla para tierra se pueden considerar arreglos de sistemas de tierra en subestaciones y terrenos similares existentes; la longitud total de conductor, el arreglo de la rejilla para tierra, así como la cantidad de electrodos verticales (varillas para tierra) se verifican y en función de los resultados de los cálculos de la resistencia eléctrica máxima y de las tensiones seguras de paso y de contacto si es necesario se podrán modificar.

Para el diseño del sistema de tierra se considera únicamente el conductor enterrado con o sin electrodos verticales (varillas para tierra)

En el diseño inicial debe considerarse el colocar electrodos verticales (varillas para tierra) en los extremos de la rejilla para tierra y en algunos puntos de unión del perímetro.

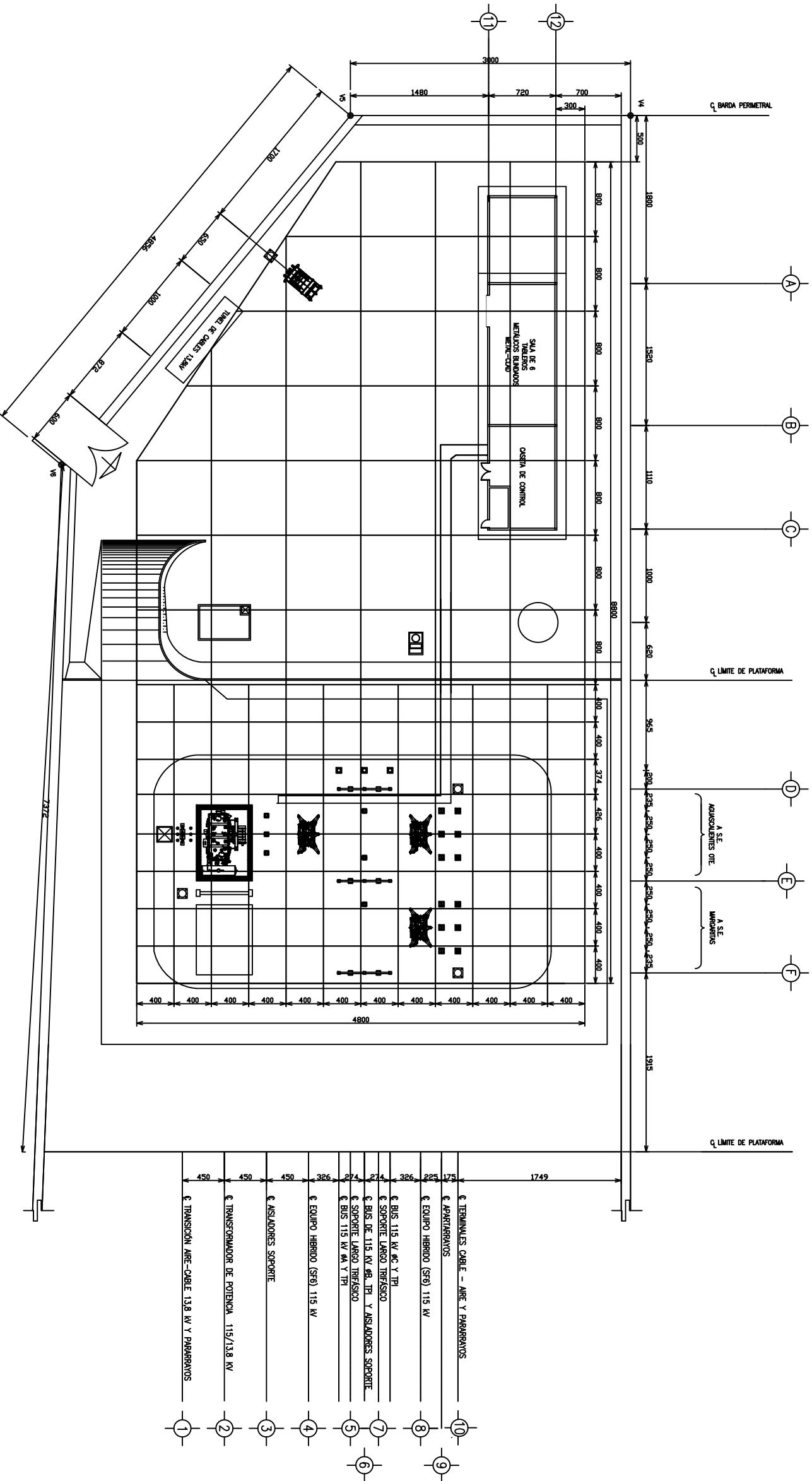
Se deben también colocar electrodos verticales (varillas para tierra) en equipos como apartarrayos, interruptores y transformadores de potencia

En suelos con alta resistividad, es conveniente utilizar electrodos verticales (varillas para tierra) de longitud apropiada instaladas en los puntos de unión de la rejilla para tierra.

Deben emplearse dos conductores de puesta a tierra en diferentes puntos de la rejilla en donde puedan ocurrir altas concentraciones de gradientes de potencial, como en la conexión del neutro de tierra de los generadores y transformadores, bancos de capacitores, interruptores y apartarrayos.

Por lo tanto apegándonos a las indicaciones anteriores para este caso de acuerdo al plano se propuso la siguiente disposición: la cual consistió en una malla con una cuadrícula de 4 x 4 m para la zona de equipos y se continuó con una cuadrícula de 8 x 8 para el patio restante. Los electrodos verticales (varillas para tierra) se colocaron principalmente en el área de equipos en especial cerca de los interruptores, transformador y apartarrayos, así también se colocaron en el perímetro de la malla sobre las esquinas de la misma sumando un total de 20 electrodos verticales





- 10- TERMINALES CABLE - AIRE Y PARABRUVOS
- 9- APERTURAS
- 8- EQUIPO HIBRIDO (SFB) 115 KV
- 7- BUS 115 KV AC Y TPI
- 6- SOPORTE LARGO TIRASICO
- 5- BUS DE 115 KV BR. TPI Y AISLADORES SOPORTE
- 4- SOPORTE LARGO TIRASICO
- 3- BUS 115 KV AA Y TPI
- 2- EQUIPO HIBRIDO (SFB) 115 KV
- 1- AISLADORES SOPORTE
- TRANSFORMADOR DE POTENCIA 115/13.8 KV
- TRANSICION AIRE-CABLE 13.8 KV Y PARABRUVOS

No.	REVISADO PARA CONSTRUCCION	DESIGNADO	CAJABOS	HAZ	HRH	HRM	27/08/10
0				ESBOZO	REVISO	APROBO	FECHA

		<b>COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD</b> SUBDIRECCION DE DISTRIBUCION	
No. DE PLANO SMOE-029-PL-C-324 No. DE PROYECTO 0029		No. DE PLANO DE C.F.E. IDENTIFICADOR DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	
PROYECTO: S.E. SADEMEX			
TITULO: RED DE TIERRAS			
ELEGIDO: MRS. VICTOR RAJO BOMILLA REVISO: MRS. RICARDO HERNANDEZ RAMIREZ VALIDO: MRS. RICARDO MORENO ROMERO NUMERO DE OBRA: MRS. VILMA TRUJILLO RAMIREZ	FECHA: AGOSTO/2010 FECHA: AGOSTO/2010 FECHA: AGOSTO/2010	ESCALA: 1:250 ADICIONALES EN: CM	No. DE PLANO DE C.F.E.



De acuerdo al plano tenemos lo siguiente:

No. DE CONDUCTORES HORIZONTALES	= 13
No. DE CONDUCTORES VERTICALES	= 16
No. DE VARILLAS PROPUESTO	= 20
AREA DE LA MALLA	= 4224 m <sup>2</sup>
LONGITUD TOTAL DE CONDUCTORES	= 1582 m
LONGITUD TOTAL DE VARILLAS	= 61 m

### 9.7. ESTIMACION DE LA RESISTENCIA DE TIERRA PRELIMINAR EN EL SISTEMA DE TIERRAS

La estimación de la resistencia de tierra preliminar en el sistema de Tierra, debe efectuarse tomando en consideración los valores siguientes:

- Para subestaciones de potencia en alta tensión a nivel de transmisión y de subtransmisión, el valor de la resistencia de la malla de tierra debe ser alrededor de 1  $\Omega$  o menor,
- Para subestaciones de potencia de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser entre 1 a 4  $\Omega$ ,
- Para subestaciones de distribución de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser como máximo de 5  $\Omega$ -m

El valor de la resistencia de tierra puede estimarse mediante las siguientes ecuaciones:

- a) Para profundidades de la red menores de 0.25 m

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T}$$

ECUACION. 11 DE CFE NRF-011-CFE

$R_g$  = Resistencia de tierra en ohms

$\rho$  = Resistividad promedio del suelo  $\Omega$ -m

A = Área ocupada por la rejilla en m<sup>2</sup>



$L_T$  = Longitud total de los conductores enterrados en m.

**NOTA: La fórmula anterior NO APLICA debido a que la profundidad a la que se está enterrando la rejilla es mayor a 0.25m**

b) Para profundidades entre 0.25 y 2.5 m se requiere una corrección por profundidad.

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

**ECUACION. 12 (VER ANEXO 1)**

$R_g$  = Resistencia de tierra en ohms

$\rho$  = Resistividad promedio del suelo  $\Omega\text{-m}$  = **62.71  $\Omega\text{-m}$**

A = Área ocupada por la rejilla en  $\text{m}^2$  = **4224  $\text{m}^2$**

$L_T$  = Longitud total de los conductores enterrados en m = **1582 m**

h = Profundidad de la rejilla para tierra en metros = **0.7 m**

**Por lo tanto se aplicó la formula anterior para el cálculo de la resistencia del suelo debido a que la profundidad a la que se enterró la malla de tierras fue 0.7 m y la resistividad del suelo promedio es uniforme en el terreno  $\rho = 62.71 \Omega\text{-m}$ , dándonos como resultado:**

$R_g = 0.46$

**Lo que indica que nuestra resistencia cumple con lo indicado en la norma ya que el valor obtenido es menor a 1  $\Omega$ .**

c) Considerando la rejilla para tierra con electrodos verticales (varillas para tierra). Es decir el sistema de tierra consta de: conductores horizontales (rejilla para tierra) y electrodos verticales (varillas para tierra)

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}}$$

**ECUACION. 13 DE CFE NRF-011-CFE**

$R_1$  = Resistencia de los conductores de la rejilla para tierra en  $\Omega$ .



$R_2$  = Resistencia de todos los electrodos verticales (varillas para tierra) en  $\Omega$ .

$R_{12}$  = Resistencia mutua entre el grupo de conductores  $R_1$  y el grupo de electrodos verticales (varillas para tierra),  $R_2$  en  $\Omega$ .

Dónde:

$$R_1 = (\rho_1/\pi l_1) \left[ \ln(2l_1/h') + k_1 l_1/(A)^{1/2} - k_2 \right]$$
$$R_2 = (\rho_a/2n\pi l_2) \left[ \ln(8l_2/d_2) - 1 + 2k_1 l_2/(A)^{1/2} ((n)^{1/2} - 1)^2 \right]$$
$$R_{12} = (\rho_a/\pi l_1) \left[ \ln(2l_1/l_2) + k_1 l_1/(A)^{1/2} - k_2 + 1 \right]$$

Dónde:

$\rho_1$  = Resistividad del terreno con los conductores a una profundidad h, hacia abajo en  $\Omega$ -m.

$\rho_a$  = Resistividad aparente del terreno vista por el electrodo vertical (varilla para tierra), en  $\Omega$ -m.

H = Espesor de la primera capa del terreno en m.

$\rho_2$  = Resistividad del terreno desde la profundidad H, hacia abajo en  $\Omega$ -m

$l_1$  = Longitud total de los conductores de la rejilla para tierra en m.

$l_2$  = Longitud promedio del electrodo vertical (varilla de tierra) en m.

h = Profundidad de la rejilla para tierra en m.

$h'$  = Coeficiente de la profundidad de la rejilla para tierra.

$$h' = (d_1 h)^{1/2}$$

**ECUACION. 14 DE CFE NRF-011-CFE**

Para conductores enterrados a la profundidad h en m.

$h' = 0.5d_1$  Para conductores enterrados en  $h=0$  (en la superficie) en m.

A = Área cubierta por la rejilla para tierra con dimensiones "axb" en metros.

n = Número de electrodos verticales (varillas para tierra) localizada en el área A.



$k_1 k_2$  = Constantes relacionadas con la geometría del sistema de tierra

$d_1$  = Diámetro del conductor de la rejilla para tierra en m.

$d_2$  = Diámetro de los electrodos verticales (varilla de tierra) en m.

$a$  = ancho de la rejilla para tierra en m.

$b$  = largo de la rejilla para tierra en m.

Las ecuaciones anteriores son válidas para suelos de dos capas, una superior de espesor  $H$  con un cierto valor de resistividad y por donde penetran los electrodos verticales (varillas para tierra). Y una inferior de más baja resistividad con la cual los electrodos verticales (varillas para tierra) quedan en contacto.

En este caso para  $\rho_1 / \rho_2$ , la rejilla para tierra se localiza en la capa de resistividad  $\rho_1$ , pero los electrodos verticales (varillas para tierra) están en contacto tanto con la capa de resistividad  $\rho_1$ , como con la capa de resistividad  $\rho_2$ , por lo que  $R_2$  y  $R_{12}$  se calculan con una resistividad aparente  $\rho_a$  vistas por los electrodos verticales (varillas para tierra):

$$\rho_a = l_2 \rho_1 \rho_2 / [\rho_2 (H - h) + \rho_1 (l_2 + h - H)]$$

**ECUACION. 15 DE CFE NRF-011-CFE**

Para suelos con resistividad uniforme:

$$\rho_1 = \rho_2$$

Si la diferencia entre  $\rho_1$  y  $\rho_2$  no es muy grande, de preferencia  $\rho_2$  no menor que  $0,2\rho_1$ , y el espesor de la capa superior  $H$  es al menos  $0,1b$ , las ecuaciones anteriores son bastante exactas para la mayoría de los cálculos y además fáciles de aplicar.

**NOTA: debido a que la resistividad del terreno es uniforme NO APLICA dicha formula**

#### **DETERMINACION DE LA ELEVACION DEL POTENCIAL DE TIERRA**

Determinación de la elevación del potencial de tierra (GPR), mediante la siguiente ecuación:

$$GPR = I_G \times R_g$$

**ECUACION. 16 DE CFE NRF-011-CFE**



Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra en el diseño preliminar se encuentra abajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno. Únicamente se requieren conductores adicionales para la puesta a tierra de los equipos.

**NOTA: Debido a que no se cumplió con esta condición se continuó con el cálculo, este paso se obvio debido a dicho resultado**

### 9.8. CALCULO DE TENSION DE MALLA

La fórmula para calcular la tensión de malla es la siguiente:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_g}{L_m}$$

ECUACION. 17 (VER ANEXO 1)

Dónde:

$\rho$  = Resistividad promedio del suelo en  $\Omega$ -m. = **62.71  $\Omega$ -m**

$K_m$  = Factor geométrico. (Ecuación 14) = **0.67**

$K_i$  = Factor de irregularidad (ecuación 17) = **2.17**

$I_g/L_m$  = Relación de la corriente promedio por unidad de longitud de conductor efectivamente enterrado en el sistema de Tierra. (Ecuación 22) =

Fórmula para calcular  $K_m$

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

ECUACION. 18 (VER ANEXO 1)

Dónde:

D = Espaciamiento entre conductores paralelos en metros = **4 m**

h = Profundidad de los conductores en la rejilla para tierra en metros = **0.7 m**

d = Diámetro del conductor de la rejilla para tierra en metros = **0.01340 m**



$K_h$  = Factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla. (Ecuación 15) = **1.30**

$n$  = Número de conductores equivalentes en cualquier dirección = **10.28 m**

Cálculo de  $K_{ii}$ :

Para rejillas para tierra sin electrodos verticales (varillas para tierra), o con algunos electrodos verticales (varillas para tierra) dentro del área de la rejilla.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}}$$

Calculo de  $K_h$ :

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

ECUACION. 19 (VER ANEXO 1)

Dónde:

$h$  = Profundidad a la cual está enterrada la rejilla para tierra dada en metros = **0.7 m**

$h_0$  = Profundidad de referencia y es igual a 1 metro.

Cálculo de  $n$ :

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

ECUACION. 20 (VER ANEXO 1)

Dónde:

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} \text{ Para rejillas para tierras cuadradas y rectangulares} = \mathbf{10.36}$$



Dónde:

$L_p$  = Longitud de conductores en la periferia de la rejilla para tierra, dada en metros = **256 m**

$L_c$  = Longitud Total de los conductores horizontales en la rejilla para tierras = **1326 m**

$n_b$  = Para rejillas para tierra cuadradas

Para cualquier otro caso

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}}$$

Dónde:

$A$  = Área de la rejilla para tierra en  $m^2$ .

$n_c = 1$  Para rejillas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$  Para rejillas cuadradas y rectangulares.

Para la forma de esta rejilla se considera:

$$n = n_a * n_b$$

El factor de irregularidad  $K_i$

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n$$

**ECUACION. 21 (VER ANEXO 1)**





Para rejilla para tierra con electrodos verticales (varillas para tierra) en las esquinas, así como a lo largo del perímetro y distribuidas en la rejilla para tierra, la longitud efectiva del conductor  $L_m$  es:

$$L_m = L_C + \left( 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{(L_x^2 + L_y^2)^{1/2}} \right) \right) L_R$$

**ECUACION. 22 (VER ANEXO 1)**

$L_C$  = Longitud total de los conductores horizontales en la rejilla para tierra en metros. = **1582 m**

$L_R$  = Longitud total de los electrodos verticales (varillas para tierra) conectados a la rejilla en metros. = **61 m**

$L_x$  = Longitud máxima de la rejilla para tierra en la dirección x dada en metros. = **88 m**

$L_y$  = Longitud máxima de la rejilla para tierra en la dirección y dada en metros = **48 m**

### **9.9. CALCULO DE TENSION DE PASO DE MALLA**

La ecuación para calcular la tensión de paso es la siguiente:

$$E_{PASO} = \frac{\rho I_G K_S K_i}{L_S}$$

**ECUACION. 23 (VER ANEXO 1)**

Véase significado de siglas en las formulas de la tensión de malla, la adicional es la siguiente:

$K_s$  = Factor geométrico. (ecuación 25)

$K_i$  = Factor de corrección. (ecuación 21)

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



$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R$$

**ECUACION. 24 (VER ANEXO 1)**

Fórmula para calcular  $K_s$ :

Para profundidades usuales de rejilla para tierra entre  $0,25 < h < 2,5$  m, la constante  $K_s$  se obtiene como:

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

**ECUACION. 25 (VER ANEXO 1)**

Véase significado de siglas en las ecuaciones del cálculo de la tensión de malla.

TABLA COMPARACION DE POTENCIALES		
	TENSIONES MAXIMAS PERMISIBLES POR EL CUERPO HUMANO	TENSIONES DE MALLA
$E_{CONTACTO}$	1,066.18	684.86
$E_{PASO}$	3,793.71	357.10

**TABLA N. 6 COMPARACION DE POTENCIALES**