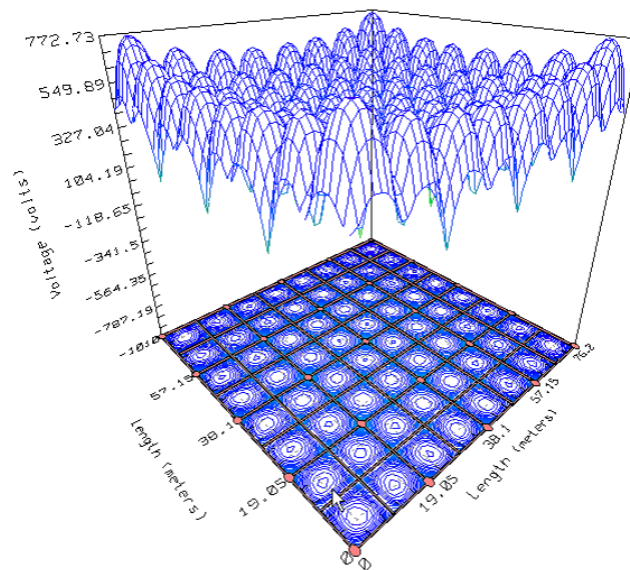




**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**CURSO EIE 803-1**  
**PROYECTO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**  
**Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**



**“DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA”**

**CARLOS ROJAS AGÜERO**  
**PROFESOR**

**MARZO 2018**

## ÍNDICE

### CONTENIDO

<b>1.1</b>	<b>Generalidades</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Definiciones Básicas</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Procedimiento de Diseño</b>	<b>4</b>
1.3.1	Corriente de Falla	6
1.3.2	Sección del Conductor	7
1.3.3	Tensiones de Paso y Contacto Tolerables	8
1.3.4	Resistividad Equivalente del Terreno	11
1.3.5	Estimación de la Longitud de Conductor	13
1.3.6	Tensión de Paso y Contacto	14
1.3.7	Resistencia de la Malla	18
<b>1.4</b>	<b>Aplicación</b>	<b>21</b>
1.4.1	Datos Iniciales	21
1.4.2	Diámetro del Conductor	22
1.4.3	Tensión de Paso y Contacto Tolerables	24
1.4.4	Diseño Inicial	25
1.4.5	Resistencia de la Malla	25
1.4.6	Corriente Máxima de Diseño	26
1.4.7	Elevación de Tensión de la Malla	26
1.4.8	Tensión de Paso y Tensión de Contacto	26
1.4.9	Verificación Tensión de Contacto	29
1.4.10	Verificación Tensión de Paso	29

## DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

### 1.1 GENERALIDADES

Para que un Sistema de Energía Eléctrica opere correctamente, con una adecuada continuidad de servicio, con un desempeño seguro de las protecciones y además para garantizar la seguridad de las personas que trabajan en las instalaciones de éstos sistemas o transitan en sus cercanías, es de vital importancia el adecuado diseño de la puesta a tierra.

Esencialmente los sistemas de puesta a tierra son diseñados para atender los siguientes objetivos:

- Evitar diferencias de potencial peligrosos para las personas que laboran o transitan en las instalaciones, particularmente en condiciones de falla.
- Proporcionar una vía de baja impedancia para la operación correcta de las protecciones.
- Contribuir a establecer valores de tensión adecuadamente bajos entre las fases sanas y tierra, durante fallas residuales en los sistemas eléctricos.
- Conducir a tierra en forma eficiente las corrientes provenientes de descargas atmosféricas, limitando las diferencias de potencial que pudiera producirse en la instalación.

### 1.2 DEFINICIONES BASICAS

Los potenciales que determinan un buen diseño son: Tensión de paso, Tensión de contacto, Tensión de retículo y Potencial transferido. Estos parámetros son definidos como:

- Tensión de paso ( $E_s$ ): Es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos sobre el terreno separados entre sí a una distancia de un paso, la cual se supone de 1 metro.
- Tensión de contacto ( $E_t$ ): Es la diferencia de potencial máxima entre una estructura u objeto metálico puesto a tierra y un punto sobre la superficie del terreno a una distancia

horizontal de 1 metro.

- Tensión de contacto máximo ( $E_m$ ): Es la máxima tensión de contacto que se encuentra al interior del reticulado de una puesta a tierra.
- Tensión transferida ( $E_{tr}$ ): Es un caso especial de tensión de contacto, en el cual la tensión es transferida dentro o fuera de la subestación.
- Tensión de contacto metal-metal ( $E_{mm}$ ): Es la diferencia de potencial entre objetos metálicos o estructuras que se encuentran al reticulado de una puesta a tierra.
- Elevación de potencial de la malla ( $GPR$ ): Es el máximo potencial que tiene la puesta a tierra, medida con respecto a una tierra remota.

Las figuras 1-1 y 1-2 muestran las diferentes tensiones definidas anteriormente.

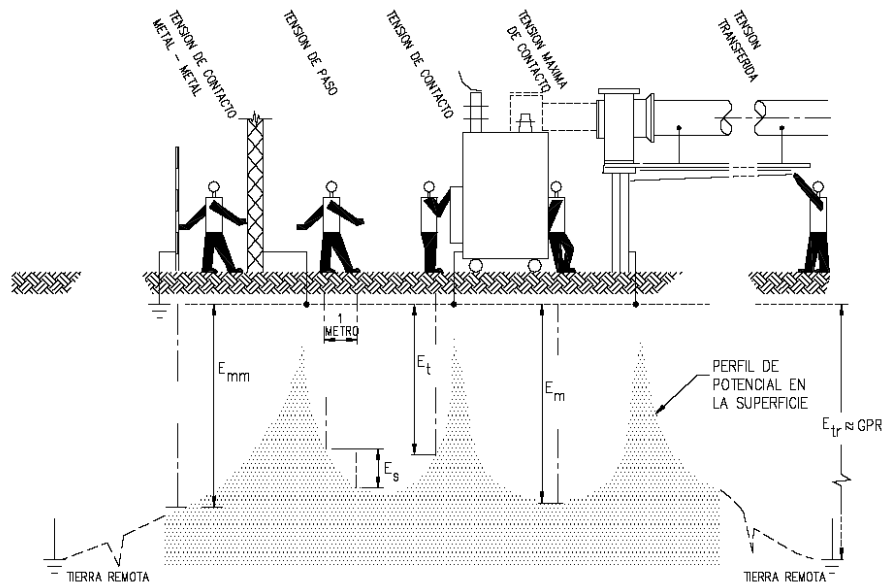
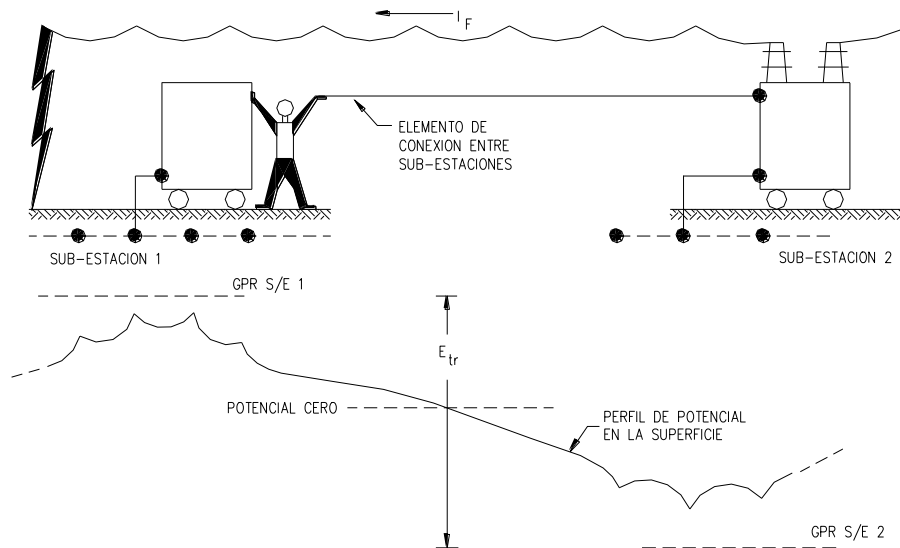


Figura 1-1 Diferentes tensiones presentadas en caso de falla.



**Figura 1-2 Situación típica del potencial transferido.**

### 1.3 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

Existen varios parámetros que pueden afectar a estos voltajes, tanto en el área interna como externa de una subestación. La corriente de falla, duración de la falla, resistividad del terreno, tipo de material en la superficie, dimensión y forma de la malla, son algunos parámetros que tienen una influencia sustancial en los valores de tensión señalados.

Con el objeto de realizar un buen diseño, todos los parámetros mencionados anteriormente deben tomarse en consideración.

En la figura 1-3 se muestra un diagrama de flujo, el cual incluye todos estos parámetros y además entrega un orden sistemático para el diseño de sistemas de puesta a tierra.

Todos los elementos del diagrama de flujo serán analizados en detalle en las siguientes secciones de este capítulo.

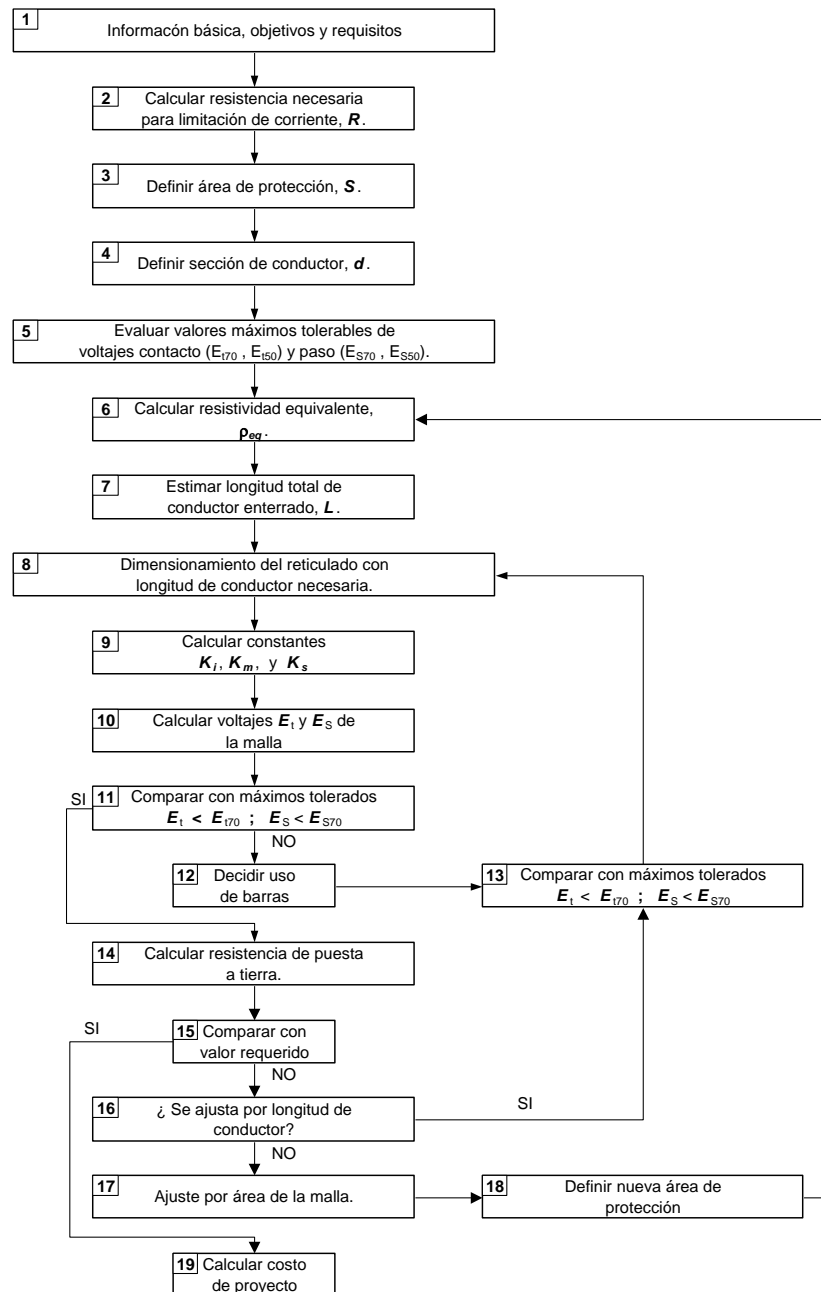


Figura 1-3 Procedimiento de diseño

### 1.3.1 Corriente de Falla

Para el cálculo de la máxima corriente  $I_g$  que fluye a la malla de puesta a tierra, se deben efectuar los siguientes pasos:

- Determinar la corriente de falla a tierra  $I_f$  que produce el mayor flujo de corriente hacia la malla.
- Determinar, a través de cálculos, el factor de distribución de corriente  $S_f$  para la peor condición encontrada en (a) y establecer el valor correspondiente de  $I_g = S_f I_f$ .
- Para la falla encontrada en (a), se debe determinar el tiempo de duración de ésta  $t_f$ , de tal forma de calcular el factor de decremento  $D_f$ , el cual servirá para incorporar los efectos de asimetría de la corriente.
- Una vez logrado el punto (c), se conocerá la peor condición de corriente dada por  $D_f I_g$ , a cuyo valor se le incorporará el factor de proyección  $C_p$ , que representa el futuro crecimiento del sistema.

Siguiendo los pasos señalados en los puntos anteriores, se llega a que la corriente a considerar en el diseño de la puesta a tierra, estará dada por:

$$I_g = C_p D_f S_f I_f \quad (1-1)$$

O bien:

$$I_g = 3C_p D_f S_f I_0 \quad (1-2)$$

Donde:

$S_f$  : Factor de distribución de corriente.

$D_f$  : Factor de decremento.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}} \right)} \quad (1-3)$$

- $T_a$  : Constante de tiempo subtransitoria, en s,  $T_a = \frac{X}{2\pi f R}$ , el valor de  $X/R$  se determina en el punto de ubicación de la falla.
- $f$  : Frecuencia, en Hz.
- $t_f$  : Tiempo de duración de la falla, en s.
- $C_p$  : Factor de crecimiento.
- $I_0$  : Corriente de secuencia cero.

### 1.3.2 Sección del Conductor

Los parámetros más importantes que deben ser considerados en la selección del conductor de la puesta a tierra, son la máxima corriente de falla y el tiempo máximo de duración de ésta.

La expresión que determina la sección del conductor está dada por:

$$I = A \sqrt{\left( \frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_t \rho_t} \right) \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad (1-4)$$

Donde:

- $I$  : Corriente r.m.s., en kA.
- $A$  : Sección del conductor en mm<sup>2</sup>.
- $T_m$  : Temperatura máxima permisible en °C.
- $T_a$  : Temperatura ambiente en °C.



- $\alpha_0$  : Coeficiente térmico de resistividad a 0 °C, en 1/°C.  
 $\alpha_t$  : Coeficiente térmico de resistividad a t °C, en 1/°C.  
 $\rho_t$  : Resistividad del conductor a t °C, en  $\mu\Omega\text{cm}$ .  
 $K_0$  :  $1/\alpha_0$ , en °C.  
 $t_c$  : Tiempo de duración de la falla, en s.  
TCAP : Constante del material, en joules/(cm<sup>3</sup>·°C).

La ecuación (1-4) se puede simplificar, quedando la siguiente expresión:

$$A = 0,506 \cdot I \cdot K_f \sqrt{t_c} \quad (1-5)$$

Donde

- $K_f$  : Es una constante que se obtiene de la Tabla 1-1.

**Tabla 1-1 Constantes del material**

Material	Conductividad d (%)	Tm (°C)	Factor $K_f$
Cobre Blando	100,0	1.083	7,00
Cobre duro	97,0	1.084	7,06
Cobre duro	97,0	250	11,78

### 1.3.3 Tensiones de Paso y Contacto Tolerables

Ante la ocurrencia de una falla en el sistema eléctrico, la seguridad de una persona depende de la cantidad de energía que ésta absorbe antes que se aclare la falla. La tensión máxima, en tal caso, no debe exceder los límites tolerables.

En el caso de la tensión de paso, el valor máximo tolerable está dado por las

siguientes expresiones:

- Para una persona de 50 Kg. de peso

$$E_{s50} = (1.000 + 6C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_S}} \quad (1-6)$$

- Para una persona de 70 Kg. de peso

$$E_{s70} = (1.000 + 6C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_S}} \quad (1-7)$$

En el caso de la tensión de contacto, el valor máximo tolerable está dado por las siguientes expresiones:

- Para una persona de 50 Kg. de peso

$$E_{t50} = (1.000 + 1,5C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_S}} \quad (1-8)$$

- Para una persona de 70 Kg. de peso

$$E_{t70} = (1.000 + 1,5C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_S}} \quad (1-9)$$

Donde:

$C_S$  : 1 si no se utiliza una capa superficial de protección (como gravilla, concreto, u otro material), en otro caso, este factor se determina de la figura 1-4.

- $\rho_s$  : Resistividad de la capa superficial, en  $\Omega m$ .  
Si no se utiliza un material en la superficie, este valor corresponde a la resistividad de la primera capa del terreno.
- $t_s$  : Tiempo de duración de la falla, en s.

La expresión que determina el factor  $C_s$ , está dada por:

$$C_s = \frac{1}{0,96} \left[ 1 + 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{k^l}{\sqrt{1 + (2lh_s / 0,08)^2}} \right] \quad (1-10)$$

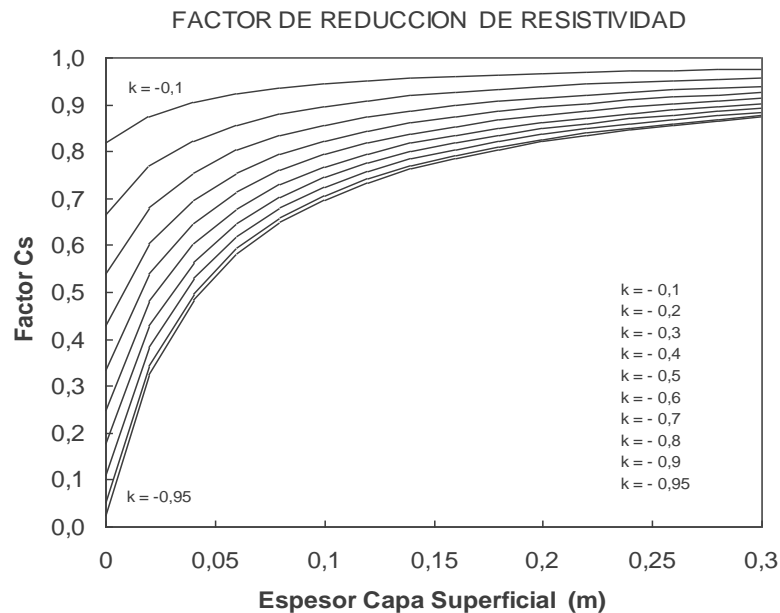
Donde:

- $k$  : Factor de reflexión  $k = (\rho_1 - \rho_s) / (\rho_1 + \rho_s)$
- $\rho_s$  : Resistividad de la capa superficial, en  $\Omega m$ .
- $\rho_1$  : Resistividad del primer estrato, en  $\Omega m$ .
- $h_s$  : Espesor de la capa superficial, en m.

Una expresión simplificada de la ecuación (1-10) es la siguiente:

$$C_s = 1 - 0,09 \frac{\left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \quad (1-11)$$

Los valores de  $C_s$  obtenidos de la ecuación (1-11) tienen un error de un 5% comparado con el valor real obtenido de la ecuación (1-10).



**Figura 1-4 Factor de reducción  $C_s$ .**

### 1.3.4 Resistividad Equivalente del Terreno.

La mayoría de los procedimientos de diseño de puesta a tierra, se basan en la suposición de terreno homogéneo. En algunos casos, se considera la existencia de un estrato superior de espesor finito, seguido de un medio semi-infinito de diferente resistividad. Tales suposiciones son mantenidas normalmente con el propósito de simplificar las expresiones matemáticas, cuya complejidad aumenta cuando se tienen terrenos compuestos por tres o más medios distintos. Lo anterior necesariamente conduce a reducir el modelo de terreno estratificado, a un modelo práctico de terreno homogéneo equivalente, o bien con una mayor aproximación a un terreno bi-estratificado.

Un método ampliamente utilizado, es el que corresponde a la reducción de Burgsdorf-Yakovs.

La teoría de este método se fundamenta en el postulado de que la reducción de

un modelo multiestratificado de terreno a un modelo de dos capas, debe ser tal que mantenga invariable el valor de la resistencia de puesta a tierra. La versión original consiste por lo tanto en reducción a un equivalente de dos capas, sin embargo admite sin problemas la extensión a un equivalente total.

Este método de reducción establece las siguientes expresiones:

- a) Cuando **m** capas desde la superficie se reducen a una sola equivalente.

$$\rho_{eq(1 \rightarrow m)} = \frac{F_m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\rho_i} [F_i - F_{i-1}]} \quad (1-12)$$

Con  $F_0 = 0$

- b) Cuando las capas desde (**m + 1**) a **n**, ambas inclusive, se reducen a una sola equivalente (**m < n**).

$$\rho_{eq(m+1 \rightarrow n)} = \frac{F_m}{\sum_{i=m+1}^n \frac{1}{\rho_i} [F_i - F_{i-1}]} \quad (1-13)$$

Con  $F_n = 1$

Donde los parámetros son:

- $\rho_i$  : Resistividad del estrato "**i**", supuesto uniforme, en  $\Omega m$ .  
 $h_i$  : Profundidad desde la superficie del terreno al término del estrato "**i**", en m.  
**S** : Area que cubre el perímetro del electrodo de tierra, en  $m^2$ .

- b : Máxima profundidad de conductor enterrado, medida desde la superficie en m, incluye la profundidad de enterramiento de la malla y de las barras verticales, si es el caso.

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1-14)$$

$$r_o^2 = r^2 - b^2 \quad (1-15)$$

$$q_o^2 = 2r(r + b) \quad (1-16)$$

$$u_i^2 = q_o^2 + r_o^2 + h_i^2 \quad (1-17)$$

$$v_i^2 = 0,5 \left[ u_i^2 - \sqrt{u_i^4 - 4q_o^2 r_o^2} \right] \quad (1-18)$$

$$F_i = \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{r_o^2}} \quad (1-19)$$

### 1.3.5 Estimación de Longitud de Conductor

En este punto se muestra una expresión para determinar en forma estimada, la cantidad de conductor que se requiere enterrar. Para lograr tal estimación, se hace uso de la expresión de Laurent, la cual establece una relación para determinar la resistencia de una puesta a tierra enterrada en un medio homogéneo.

$$R = \frac{\rho_{eq}}{4\sqrt{\frac{S}{\pi}}} + \frac{\rho_{eq}}{L} \quad (1-20)$$

Donde:

- $\rho_{eq}$  : Resistividad equivalente del terreno, en  $\Omega m$ .  
 $S$  : Superficie de la malla, en  $m^2$ .  
 $L$  : Largo total de conductor enterrado, en m.

De la ecuación (1-20) se puede determinar que la longitud de conductor a enterrar será:

$$L = \frac{\rho_{eq}}{R - \frac{\rho_{eq}}{4\sqrt{\frac{S}{\pi}}}} \quad (1-21)$$

### 1.3.6 Tensiones de Paso y Contacto

La determinación de las tensiones de paso y de contacto respectivamente, se puede obtener utilizando las siguientes expresiones:

#### 1.3.6.1 Tensión de contacto ( $E_m$ ).

La tensión de contacto se obtiene del producto del factor geométrico  $k_m$ , el factor de corrección  $k_i$ , la resistividad del suelo  $\rho$  y la corriente por unidad de longitud de conductor  $I_G/L_M$ .

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (1-22)$$

El factor geométrico  $K_m$ , se define como:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot h \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (1-23)$$

Para mallas con barras a lo largo del perímetro o para mallas con barras en las esquinas o barras en el perímetro y en las esquinas, se tiene que:

$$K_{ii} = 1$$

Para mallas sin barras o mallas con pocas barras, pero no ubicadas en el perímetro ni en las esquinas, se tiene que:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (1-24)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad ; \quad h_0 = 1 \text{ m} \quad (1-25)$$

Para que las ecuaciones desarrolladas sean aplicables tanto a mallas rectangulares como a mallas con forma irregular, el número de conductores paralelos en una malla se compone de cuatro factores de forma, los que tienen las siguientes expresiones:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (1-26)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (1-27)$$



$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{S}}} \quad (1-28)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{S} \right]^{\frac{0,7S}{L_x L_y}} \quad (1-29)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (1-30)$$

- $L_c$  : Longitud total de conductor de la malla horizontal, en m.  
 $L_p$  : Longitud perimetral de la malla, en m.  
 $S$  : Area cubierta por la malla, en m<sup>2</sup>.  
 $L_x$  : Longitud máxima de la malla en la dirección  $x$ , en m.  
 $L_y$  : Longitud máxima de la malla en la dirección  $y$ , en m.  
 $D_m$  : Distancia máxima entre dos puntos de la malla, en m.  
 $D$  : Distancia entre conductores paralelos, en m.  
 $h$  : Profundidad de enterramiento de la malla, en m.  
 $d$  : Diámetro del conductor de la malla, en m.

En el caso de mallas rectangulares o cuadradas, se tiene que:

- $n_b$  = 1 para mallas cuadradas.  
 $n_c$  = 1 para mallas cuadradas y rectangulares.  
 $n_d$  = 1 para mallas cuadradas, rectangulares y de forma “L”.

El factor de corrección  $K_i$  se define como:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (1-31)$$

Para mallas sin barras, o pocas barras distribuidas a través de la malla, pero ninguna ubicada en las esquinas o perímetro, se define la longitud efectiva enterrada  $L_M$ , como:

$$L_M = L_c + L_R \quad (1-32)$$

Donde:

$L_R$  : Longitud total de las barras conectadas, en m.

Para mallas con barras en las esquinas y/o en el perímetro, la longitud efectiva enterrada  $L_M$  se define como:

$$L_M = L_c + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (1-33)$$

Donde:

$L_r$  : Longitud de cada barra, en m.

#### 1.3.6.2 Tensión de paso ( $E_s$ )

La tensión de paso se obtiene del producto del factor geométrico  $K_s$ , el factor de corrección  $K_i$ , la resistividad del suelo  $\rho$  y la corriente por unidad de longitud de conductor  $I_G/L_s$ .

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (1-34)$$

El factor geométrico  $K_S$ , se define como:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (1-35)$$

Para mallas con barras o sin barras, se define la longitud efectiva enterrada  $L_S$ , como:

$$L_S = 0,75 \cdot L_c + 0,85 \cdot L_R \quad (1-36)$$

### 1.3.7 Resistencia de la Malla

Para el cálculo de la resistencia de la malla, se pueden utilizar dos expresiones, dependiendo si se usa en terreno homogéneo o en un terreno de dos estratos.

Para el caso de terreno homogéneo, se utiliza la expresión de Sverak:

$$R = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20S}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/S}} \right) \right] \quad (1-37)$$

En el caso de un terreno bi-estratificado, se utiliza la expresión de Schwartz:

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (1-38)$$

Donde:

- $R_1$  : Resistencia de los conductores que forman la malla, en  $\Omega$ .  
 $R_2$  : Resistencia de las barras conectadas a la malla, en  $\Omega$ .  
 $R_m$  : Resistencia mutua entre los conductores de la malla  $R_1$  y las barras  $R_2$  en  $\Omega$ .

La resistencia de los conductores que forman la malla, está dada por la siguiente expresión:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{S}} - K_2 \right] \quad (1-39)$$

Donde:

- $\rho$  : Resistividad del terreno, en  $\Omega \cdot m$ .  
 $L_c$  : Longitud total del conductor que forma la malla, en m.  
 $a'$  :  $\sqrt{2a \cdot h}$  para conductores enterrados a una profundidad  $h$ , o bien " $a$ " para conductores a  $h = 0$  (en la superficie del terreno).  
 $2a$  : Diámetro del conductor, en m.  
 $S$  : Area cubierta por la malla, en  $m^2$ .  
 $K_1, K_2$  : Coeficientes relacionados con la geometría de la malla.

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3h}{\sqrt{S}} - 0,044 \frac{A}{B} \quad (1-40)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8h}{\sqrt{S}} + \left( 0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \right) \frac{A}{B} \quad (1-41)$$

- A : Lado mayor de la malla, en m.  
B : Lado menor de la malla, en m.

La resistencia de las barras conectadas a la malla, está dada por la siguiente expresión:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[ \ln \left( \frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 \cdot L_r}{\sqrt{S}} (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (1-42)$$

Donde:

- $L_r$  : Longitud promedio de las barras, en m.  
 $2b$  : Diámetro de las barras, en m.  
 $n_r$  : Número de barras ubicadas en el área cubierta por la malla.

La resistencia mutua entre los conductores de la malla y las barras, está dada por la siguiente expresión:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (1-43)$$

## 1.4 APLICACIÓN

En este punto se muestra una aplicación de la metodología señalada en los puntos anteriores para el diseño de sistemas de puesta a tierra.

Los datos a considerar para el diseño son los siguientes:

–	Tiempo de duración de la falla	= 0,5 s
–	Tensión línea – línea	= 115 kV
–	Impedancia equivalente secuencia positiva $Z_1$	= $4,0+j10,0 \Omega$ (lado 115 kV)
–	Impedancia equivalente secuencia cero $Z_0$	= $10,0+40,0 \Omega$ (lado 115 kV)
–	Factor de distribución de corriente $S_f$	= 0,6
–	Resistividad del terreno $\rho$	= 400 $\Omega\text{m}$
–	Resistividad capa superficial $\rho_s$	= 2500 $\Omega\text{m}$
–	Espesor capa superficial $h_s$	= 0,102 m
–	Profundidad de enterramiento $h$	= 0,5 m
–	Area disponible para la malla $S$	= 63m x 84m
–	Impedancia del transformador $Z_1$ y $Z_0$ ( $Z = 9\%$ a 15 MVA, 115/13 kV)	= $0,034+j1,014 \Omega$ (lado 13 kV)

Usando el procedimiento indicado en la figura 1-3 y en las ecuaciones de los puntos anteriores se tiene que el diseño de la puesta a tierra quedará definido de acuerdo a los siguientes pasos:

### 1.4.1 Datos iniciales

El diseño considera una malla enterrada en un suelo homogéneo de 400  $\Omega\text{m}$ . La configuración de la malla se muestra en la figura 1-5, donde cada uno de los retículos tiene dimensiones de 7m x 7m.

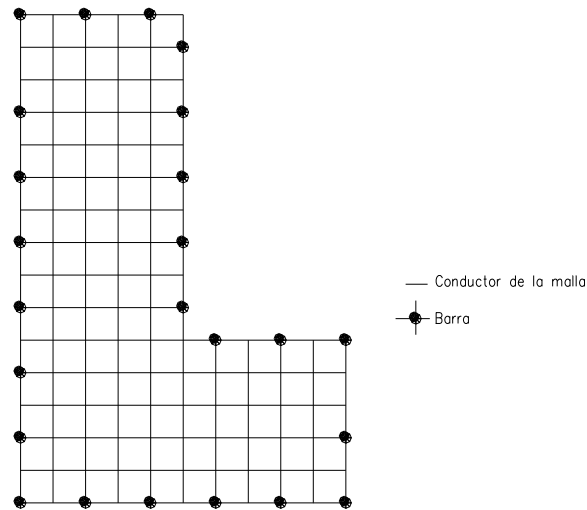


Figura 1-5 Malla irregular de forma “L” con 24 barras de 7,5 m cada una.

#### 1.4.2 Diámetro del conductor.

Si se desprecia la resistencia, entonces la corriente de falla simétrica  $I_f \approx 3 I_0$ , estará dada por:

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)}$$

Para la barra de 115 kV

$$3I_0 = \frac{(3)(115.000/\sqrt{3})}{3(0) + (4,0 + 4,0 + 10,0) + j(10,0 + 10,0 + 40,0)}$$

Luego,  $|3I_0| = 3.180 \text{ A}$  y  $x/R = 3,33$ .

Para la falla en la barra de 13 kV, las impedancias del transformador serán:

$$Z_1 = \left( \frac{13}{115} \right)^2 (4,0 + j10,0) + 0,034 + j1,014 = 0,085 + j1,142$$

$$Z_0 = 0,034 + j1,014$$

$$3I_0 = \frac{(3)(13.000/\sqrt{3})}{3(0) + (0,085 + 0,085 + 0,034) + j(1,142 + 1,142 + 1,014)}$$

Luego,  $|3I_0| = 6.814 \text{ A}$  y  $x/R = 16,2$

Usando la ecuación (1-3) para un tiempo de duración de la falla de 0,5 s y la relación  $x/R = 16,2$  se obtiene un factor de decremento  $D_f \approx 1,0$ , luego la corriente de falla asimétrica a considerar en el dimensionamiento del conductor será de 6.814 A.

Usando un conductor de cobre duro, con una temperatura de fusión de 1.084°C, se tiene que la sección requerida es:

$$A_{kcmil} = I \cdot K_f \sqrt{t_c}$$

$$A_{kcmil} = 6.814 \cdot 7,06 \sqrt{0,5} = 34,02 \text{ kcmil}$$

$$34,02 \text{ kcmil} = 17,2 \text{ mm}^2 \text{ (N}^\circ 4 \text{ AWG)}$$

Sin embargo, por razones mecánicas y de rigidez durante la instalación del cable, se recomienda el uso de un conductor de cobre desnudo N° 2/0 AWG, cuyo diámetro es de 0,0105 m.



### 1.4.3 Tensión de paso y contacto tolerable.

Para un espesor de gravilla de 0,102 m, resistividad de 2500  $\Omega\text{m}$  y una resistividad del terreno de 400  $\Omega\text{m}$ , se tendrá que el factor de reflexión estará dado por:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$K = \frac{400 - 2.500}{400 + 2.500} = -0,72$$

De la ecuación (1-11) se tiene que el factor de reducción  $C_s$  está dado por:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09}$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left( 1 - \frac{400}{2.500} \right)}{2(0,102) + 0,09} = 0,74$$

Luego, considerando una persona de 70 Kg. de peso, se tiene que las tensiones de paso y contacto tolerables estarán dadas por:

$$E_{s70} = (1.000 + 6C_s\rho_s)0,157 / \sqrt{t_s}$$

$$E_{s70} = [(1.000 + 6(0,74)2.500)]0,157 / \sqrt{0,5} = 2.686,6 \text{ V}$$

$$E_{t70} = (1.000 + 1,5C_s \rho_s) 0,157 / \sqrt{t_s}$$

$$E_{t70} = [(1.000 + 1,5(0,74)2.500)] 0,157 / \sqrt{0,5} = 838,2 \text{ V}$$

#### 1.4.4 Diseño inicial.

Tomando en consideración la configuración de la malla en la figura 1-5, cuyo espaciamiento entre conductores es  $D=7\text{m}$ , profundidad de enterramiento  $h=0,5\text{m}$  y las barras indicadas, se tiene que el largo total de conductor enterrado será:

$$L = 1.625 \text{ m} + 24 \cdot 7,5 \text{ m} = 1.755 \text{ m}$$

$$S = 105 \text{ m} \cdot 35 \text{ m} + 35 \text{ m} \cdot 35 \text{ m} = 4.900 \text{ m}^2$$

#### 1.4.5 Resistencia de la malla.

Usando la ecuación (1-37), se tendrá que la resistencia de la malla de puesta a tierra esta dada por:

$$R = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20S}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/S}} \right) \right]$$

$$R = 400 \left[ \frac{1}{1.755} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 4.900}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5\sqrt{20/4.900}} \right) \right] = 2,74 \Omega$$

#### 1.4.6 Corriente máxima de diseño.

Según el procedimiento y las definiciones señaladas en el punto 1.3.1, la corriente máxima de diseño para la malla está dada por:

$$I_g = |3I_0| \cdot C_p \cdot D_f \cdot S_f$$

$$I_g = 3.180 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,6 = 1.908 \text{ A}$$

#### 1.4.7 Elevación de tensión de la malla.

Con los valores de resistencia y corriente máxima de diseño, se tiene que la elevación de tensión de la malla está dada por:

$$E_G = 1.908 \cdot 2,74 = 5.228 \text{ V}$$

Este valor es mayor que la tensión de contacto tolerable, luego es necesario seguir con el procedimiento de diseño de la malla.

#### 1.4.8 Tensión de Paso y Tensión de Contacto.

Usando las ecuaciones (1-26) – (1-30), se tiene que el número de conductores  $n$  está dado por:

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

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2 \cdot 1.575}{350} = 9$$

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

$$n_b = \sqrt{\frac{350}{4 \cdot \sqrt{4.900}}} = 1,12$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}}$$

$$n_c = \left[ \frac{70 \cdot 105}{4.900} \right]^{\frac{0,7(4.900)}{70(105)}} = 1,21$$

$$n_d = 1 \text{ para mallatipo "L"}$$

$$n = (9)(1,12)(1,21)(1) = 12,2$$

$K_m$  se determina de las ecuaciones (1-23) – (1-25) como:

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1,0}} = 1,225$$

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left[ \frac{7^2}{16(0,5)0,01} + \frac{(7 + 2(0,5))^2}{8(7)0,01} - \frac{0,5}{4(0,01)} \right] + \frac{1,0}{1,225} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2(12,2) - 1)} \right] \right] = 0,76$$

La ecuación (1-31) se utiliza para calcular  $K_i$ , como:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$K_i = 0,644 + 0,148(12,2) = 2,45$$

Finalmente,  $E_m$  se determina de las ecuaciones (1-22) y (1-33), como:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + \left[ 1,55 + 1,22 \cdot \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R}$$

$$E_m = \frac{(400)(1.908)(0,76)(2,45)}{1.575 + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{7,5}{\sqrt{70^2 + 105^2}} \right) \right] 180} = 7611 \text{ V}$$

De las ecuaciones (1-34) – (1-36) se puede determinar  $E_s$ ,  $L_s$  y  $K_s$ , como:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2(0,5)} + \frac{1}{7 + 0,5} + \frac{1}{7} (1 - 0,5^{12,2-2}) \right] = 0,41$$

Luego,

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R}$$

$$E_s = \frac{(400)(1.908)(0,41)(2,45)}{0,75(1.575) + 0,85(180)} = 574,6 \text{ V}$$

#### 1.4.9 Verificación tensión de contacto.

La tensión de contacto calculada  $E_m = 761,1\text{V}$ , es menor que la tensión de contacto tolerable  $E_{t70} = 838,2\text{V}$ , con lo cual se cumple esta primera verificación y se debe proceder a verificar la tensión de paso.

#### 1.4.10 Verificación tensión de paso.

La tensión de paso calculada  $E_s = 574,6\text{V}$ , es menor que la tensión de paso tolerable  $E_{s70} = 2686,6\text{V}$ . Debido a que las tensiones de paso y contacto calculadas son menores que los valores tolerables, no es necesario efectuar alguna modificación en el diseño.