

Capítulo 4

Memoria de Cálculo

Datos para el cálculo

Datos del Terreno

ρ = Resistividad [Ω .m]	$\rho = 160$ [Ω .m]	
ρ_s = Resistividad superficial [Ω .m]	$\rho_s = 3500$ [Ω .m]	Resistividad de la grava
h_s = Grueso de la capa superficial [m]	$h_s = 0.15$ [m]	

Datos de las varillas electrodo

L = longitud [m]	L = 3 [m]
r = radio del electrodo [m]	r = 0.008 [m]

Datos del conductor enterrado

A = radio [m] 4/0 AWG	A = 0.0064 [m]	d = 0.0128 [m]
h = profundidad de la red [m]	h = 0.6 [m]	0.25 < h < 2.5 [m]
D = espaciamiento entre conductores paralelos	D = 8 [m]	

Datos de la falla

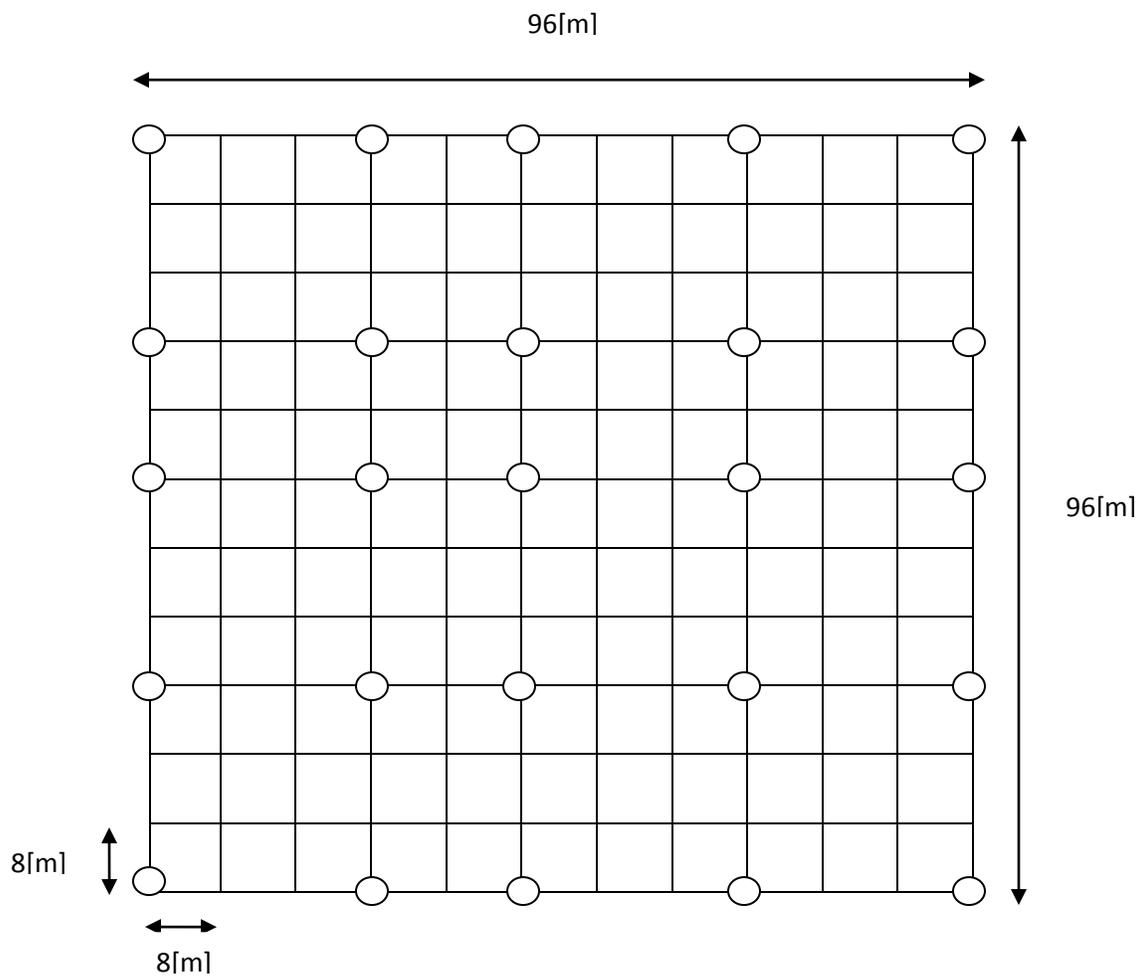
t_f = tiempo de falla [s]	$t_s = 0.5$ [s]
C_p = factor de crecimiento	$C_p = 1$
KV = voltaje del sistema	115 KV
X/R = relación X/R en el punto de falla	X/R = 10
KVA = potencia de falla	1296000 KVA
I_f = corriente simétrica de falla	

$$I_f = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \text{ KV}} \quad I_f = 6506.49 \text{ [A]}$$

S_f = factor de reducción de falla	$S_f = 1$
I_g = corriente simétrica de falla [A]	
$I_g = S_f * I_f$	$I_g = 6506.49 \text{ [A]}$

Nuestro diseño propuesto de la malla de tierra incluye 12 conductores horizontales y 12 conductores transversales, con un radio de 4/0 AWG; además de 25 electrodos de 3 metros de longitud cada uno proporcionados a lo largo de toda la malla. La cuadrícula de la rejilla para tierra será de 8 x 8 m, en toda el área del terreno, de acuerdo a las especificaciones de la norma NRF-011-CFE-2004.

La longitud total del terreno es de 96 m x 96 m, con un área total de 9216 m², como se indica en la siguiente figura:



Con estas consideraciones, procedemos a realizar los cálculos necesarios expuestos en el capítulo 3 para verificar que nuestro diseño es completamente seguro.

En base a los datos obtenidos para el cálculo, el tiempo de duración de la falla

$$t_c = 0.5 \text{ [seg]}$$

De acuerdo a la ecuación 5 :

$$I_G = D_f * I_g$$

De acuerdo a la Tabla 2, considerando $X/R = 10$, y con una duración de falla $t_f = 0.5$ segundos, el factor de decremento sería:

$$D_f = 1.026$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente:

$$I_G = (1.026)(6506.49)$$

$$I_G = 6675.66 \text{ [A]}$$

Para el cálculo de la tensión de paso y tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano, necesitamos obtener el valor del factor de reducción, el cual es:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left[1 - \frac{160}{3500} \right]}{2(0.15) + 0.09}$$

$$C_s = 0.7797$$

$$E_{\text{paso}} = [1000 + 6 (0.7797)(3500)] \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{paso}} = 2850.13 \text{ [V]} \quad (\text{para } 50 \text{ kg})$$

$$E_{\text{paso}} = [1000 + 6 (0.7797)(3500)] \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{paso}} = 3857.51 \text{ [V]} \quad (\text{para } 70 \text{ kg})$$

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + 1.5(0.7797)(3500)] \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{contacto}} = 835.57 \text{ [V]} \quad (\text{para } 50 \text{ kg})$$

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + 1.5(0.7797)(3500)] \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{contacto}} = 1130.9 \text{ [V]} \quad (\text{para } 70 \text{ kg})$$

Una vez obtenidos estas tensiones, calculamos la resistencia de tierra preliminar en el sistema de Tierra, con ayuda de la ecuación 12, debido a que la rejilla propuesta se encuentra a una profundidad de 0.6 [m]:

$$R_g = 160 \left[\frac{1}{2379} + \frac{1}{\sqrt{(20)(9216)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6 \sqrt{\frac{20}{9216}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.8024 \Omega$$

La subestación que estamos considerando de acuerdo a los 115 KV, se considera como alta tensión a nivel subtransmisión, y del lado de los 23 KV como media tensión; en base a la NRF-011-CFE-2004, el valor de la resistencia de la malla de tierra debido a las características de nuestra subestación debe ser alrededor de 1 Ω o menor, por lo que nuestro valor obtenido cumple con dicho requerimiento.

Para la determinación de la elevación del potencial de tierra, consideramos la ecuación 16:

$$GPR = I_G \times R_g$$

Al sustituir los valores:

$$GPR = (6675.66)(0.8046)$$

$$GPR = 5371.68 [V]$$

De acuerdo a la norma NRF-011-CFE-2004 y al IEEE Std 80-2000, se compara la elevación del potencial de tierra con la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, sin embargo, el GPR es mucho mayor, por lo que se debe continuar con el diseño.

$$\text{GPR} = 5371.68 \text{ [V]} > E_{\text{contacto}} = 835.57 \text{ [V]} \quad (\text{para } 50 \text{ kg})$$

$$\text{GPR} = 5371.68 \text{ [V]} > E_{\text{contacto}} = 1130.9 \text{ [V]} \quad (\text{para } 70 \text{ kg})$$

Procedemos a la obtención de la tensión de malla.

Para calcular el coeficiente K_m , hacemos uso de la ecuación 20, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

$$L_c = 2304 \text{ [m]}$$

$$L_p = 384 \text{ [m]}$$

$$A = 9216 \text{ m}^2$$

$$n_a = \frac{2 (2304)}{384} = 12$$

$$n_b = 1 \quad (\text{por ser una rejilla cuadrada})$$

Para la forma de rejilla para tierra en CFE

$$n = (12) (1) = 12$$

Para el cálculo del coeficiente K_n usamos la ecuación 19, en donde tomamos $h_o = 1$ metro

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.6}{1}} = 1.264$$

Además se consideran los siguientes valores previamente establecidos:

$$D = 8 \text{ [m]}$$

$$d = 0.0128 \text{ [m]}$$

$$h = 0.6 \text{ [m]}$$

$$K_{ji} = 1$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(8)^2}{16(0.6)(0.0128)} + \frac{(8 + 2(0.6))^2}{8(8)(0.0128)} - \frac{0.6}{4(0.0128)} \right) + \frac{1}{1.264} \ln \left[\frac{8}{\pi((2)(12) - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.7442$$

Ahora calcularemos el factor de irregularidad K_i aplicando la ecuación 21:

$$K_i = 0.644 + (0.148)(12) = 2.42$$

Asimismo, la longitud efectiva del conductor utilizado se calcula utilizando la ecuación 22, donde:

$$L_c = 2304 \text{ [m]}$$

$$L_r = 3 \text{ [m]}$$

$$L_x = 96 \text{ [m]}$$

$$L_y = 96 \text{ [m]}$$

$$L_R = 75 \text{ [m]}$$

$$L_m = 2304 + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{(96^2 + 96^2)^{1/2}} \right) \right) 75$$

$$L_m = 2422.27 \text{ [m]}$$

Gracias a los valores calculados anteriormente procedemos a obtener nuestra tensión de malla para nuestro diseño propuesto, de acuerdo a la ecuación 17:

$$E_m = \frac{160 (0.7442)(2.42)(6675.66)}{2422.27}$$

$$E_m = 794.13 \text{ [V]}$$

Una vez obtenido este valor, comparamos con la tensión de contacto obtenida anteriormente para 50 y 70 kg:

$$E_m = 794.13 \text{ [V]} < E_{\text{contacto}} = 835.57 \text{ [V]} \text{ (para 50 kg)}$$

$$E_m = 794.13 \text{ [V]} < E_{\text{contacto}} = 1130.9 \text{ [V]} \text{ (para 70 kg)}$$

Como la tensión de malla de nuestro diseño es menor a la tensión de contacto para ambos casos, podemos decir que el diseño es seguro y seguimos con los cálculos restantes.

Para calcular la tensión de paso, obtenemos el valor de L_s y del coeficiente K_s , de acuerdo a las ecuaciones 24 y 25 respectivamente:

$$L_s = 0.75 (2304) + 0.85 (75)$$

$$L_s = 1791.75 \text{ [m]}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.6)} + \frac{1}{8(0.6)} + \frac{1}{8} \left(1 - 0.5^{(12-2)} \right) \right]$$

$$K_s = 0.3315$$

$$K_i = 2.42 \text{ (calculado anteriormente)}$$

Se procede a sustituir en la ecuación 23 y así obtener la tensión de paso de acuerdo al diseño propuesto:

$$E_{\text{paso}} = \frac{160 (6675.66)(0.3315)(2.42)}{1791.75}$$

$$E_{\text{paso}} = 478.22 \text{ [V]}$$

Al comparar con los resultados obtenidos para 50 y 70 kg:

$$E_{\text{paso}} = 478.22 \text{ [V]} < E_{\text{paso}} = 2850.13 \text{ [V]} \text{ (para 50 kg)}$$

$$E_{\text{paso}} = 478.22 \text{ [V]} < E_{\text{paso}} = 3857.51 \text{ [V]} \text{ (para 70 kg)}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que nuestro sistema de tierras es seguro , al cumplir la condición fundamental descrita en el paso 10 del capítulo 3.