

Capítulo 3

Procedimiento de diseño de una red de tierras en base a la normatividad

3.1 Criterios de diseño

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas.

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina "Resistividad Aparente". La resistividad del terreno está determinada por:

a) SALES SOLUBLES

La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas.

b) COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500 ohm-m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 ohms respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible.

c) ESTRATIGRAFÍA

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3 m de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos.

d) GRANULOMETRÍA

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la

tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y ésta es mayor que la arcilla.

e) ESTADO HIGROMÉTRICO

El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno llegue a tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras.

f) TEMPERATURA

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra

g) COMPACTACIÓN

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación. En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

TELURÓMETRO

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un telurómetro de cuatro terminales llamado en algunas zonas de México como "terrómetro" o "Megger de tierras"



Los telurómetros inyectan una corriente de frecuencia diferente a 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes de ruidos eléctricos. Los telurómetros tienen cuatro terminales: 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) que están marcadas en el aparato C1 P1 P2 C2.

Como la medición obtenida por un telurómetro es puntual, para obtener una lectura promedio del sitio, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero y en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.

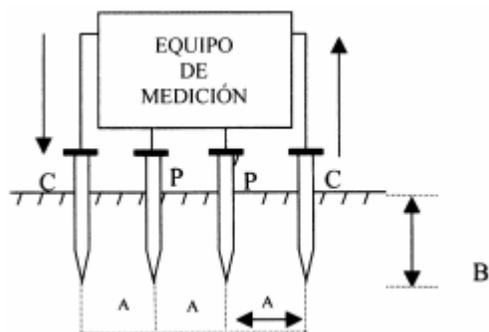
El estudio de resistividad de un terreno conlleva el obtener el perfil de resistividad del suelo en varios puntos y con esos valores se puede determinar la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

MÉTODO DE WENNER

El método de los 4 puntos de Wenner, es la técnica más utilizada comúnmente. Consiste básicamente en 4 electrodos enterrados dentro del suelo a lo largo de una línea recta, a igual distancia A de separación, enterrada a una profundidad B . La tensión entre los dos electrodos interiores de potencial es medido y dividido entre la corriente que fluye a través de los otros dos electrodos externos para dar un valor de resistencia mutua R en Ω .

Existen 2 variaciones de este método:

- a) Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner.



Donde:

A = Separación entre varillas adyacentes en m.

B = Profundidad de los electrodos en m.

C = Electrodo de corriente.

P = Electrodo de potencial.

Si la relación A/B es menor a 20 entonces se utilizará la siguiente fórmula para calcular la resistividad del terreno:

$$\rho := \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4 \cdot A^2 + 4B^2)^{0.5}}}$$

Donde

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m

A : Distancia entre electrodos en metros.

B : Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R : Lectura del terrómetro en ohms.

Si "A" y "B" se miden en cm o en m y la resistencia R en Ω , la resistividad estará dada en Ω -cm o en Ω -m respectivamente.

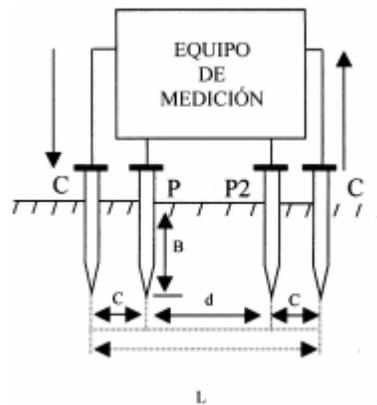
Si la longitud "B" es mucho menor que la longitud "A", es decir cuando la relación A/B sea mayor o igual a 20, puede suponerse B=0 y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR$$

Con estas fórmulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente. Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

b) Electrodo no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger - Palmer

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo mostrado en la siguiente figura



La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pequeños espaciamientos entre los electrodos, considerando que la mayor parte de la corriente que penetra depende del espaciamiento entre los electrodos. Así se asume que la resistividad medida para un espaciamiento entre electrodos "A" representa la resistividad aparente del suelo a una profundidad "B". La información de las mediciones de resistividad puede incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición. Todos los datos válidos sobre los conductores enterrados que ya se conocen o se suponen para el estudio del área, deberán anotarse en el plano de red de Tierra.

Los conductores desnudos enterrados que se encuentren en contacto con el suelo pueden invalidar lecturas realizadas por el método descrito si están bastante juntos de manera que alteren la trayectoria del flujo de la corriente. Por ésta razón, las mediciones de resistividad del suelo son de menor valor en un área en donde una rejilla de conductores ya ha sido instalada, excepto, tal vez para mediciones poco profundas dentro o cerca del centro de una gran rejilla para tierra rectangular. En tales casos una lectura poco aproximada deberá ser tomada a corta distancia fuera de la rejilla para tierra, con los electrodos de prueba en tal posición que minimicen el efecto de la rejilla para tierra sobre las trayectorias de flujo. Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la rejilla para tierra, tales anotaciones pueden ser utilizadas por medio

de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo. Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La fórmula empleada en éste caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d}$$

MÉTODO DE CAÍDA DE POTENCIAL PARA MEDICIÓN DE RESISTENCIA ÓHMICA EN UN SISTEMA DE TIERRA

El método que se utiliza es el de caída de potencial; este procedimiento involucra la utilización de dos electrodos auxiliares: uno de potencial y otro de corriente. Consiste en hacer que circule una corriente de magnitud conocida (I) a través de tierra o electrodo baja prueba (E) y un electrodo de corriente (C), y medir el efecto de esta corriente en términos de la diferencia de potencial (P); la relación V / I da el valor de resistencia.

3.2 Procedimiento del diseño de una red de tierras en base a la normatividad

La normatividad actual indica que el diseño de una red de tierras de una subestación debe tener presente los potenciales de paso y de contacto que salvaguarden la vida de las personas {250-156, 921-18}. Existen métodos de cálculo de redes de tierras basados en manuales de diseño y en el estándar IEEE Std 80-2000. Las ecuaciones simplificadas de dichos manuales nos son útiles cuando la resistividad del terreno se puede representar mediante el modelo de suelo homogéneo.

VALORES ACEPTABLES DE RESISTENCIA A TIERRA DE SUBESTACIONES

Para subestaciones, la NOM menciona:

921-25

b) Resistencia a tierra del sistema. La resistencia eléctrica total del sistema de tierra incluyendo todos los elementos que lo forman, deben conservarse en un valor menor que lo indicado en la tabla siguiente:

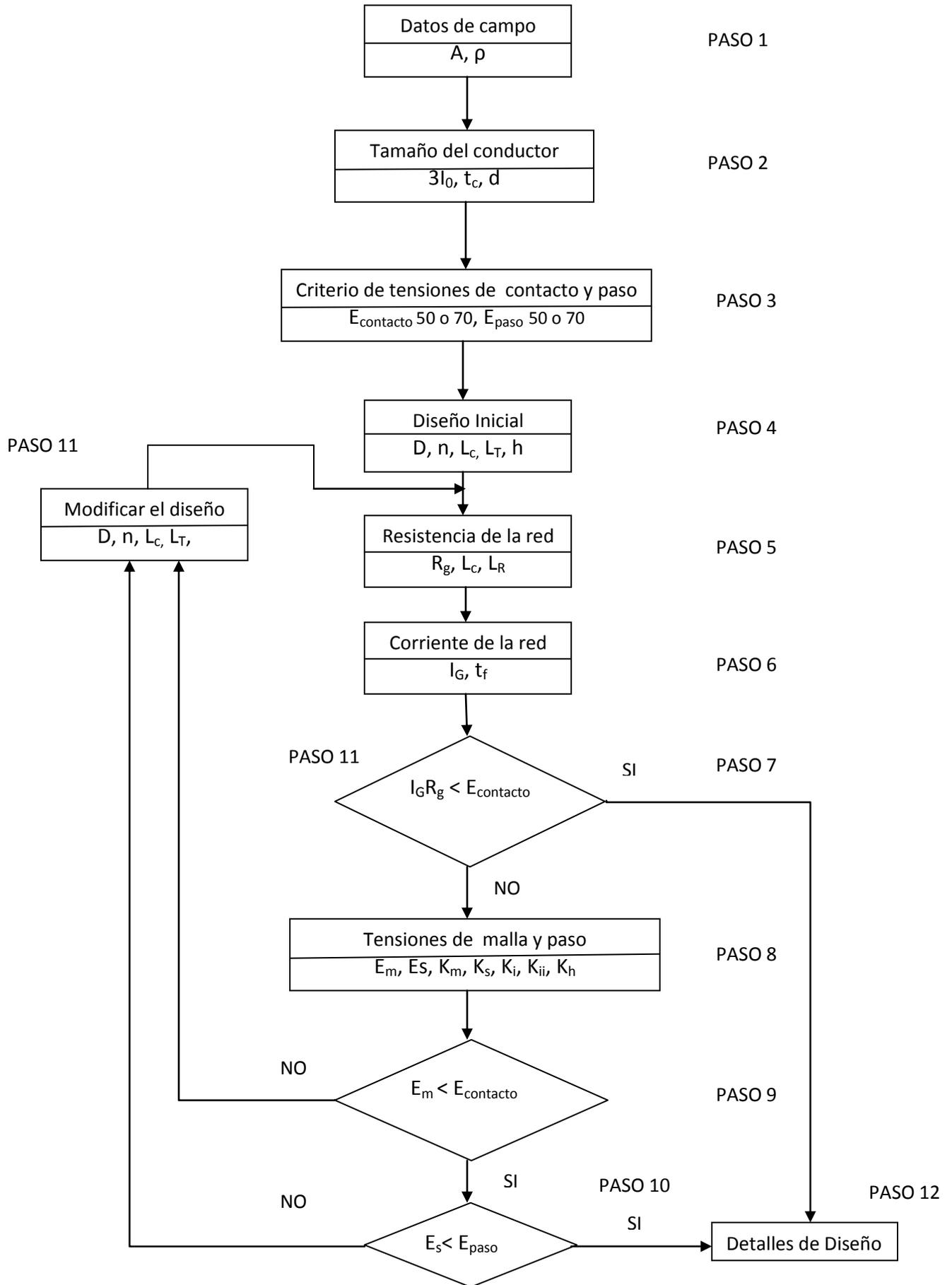
Resistencia (Ω)	Tensión eléctrica máxima (kV)	Capacidad máxima del transformador (kVA)
5	Mayor que 34.5	mayor que 250
10	34.5	mayor que 250
25	34.5	250

Hay que recordar que la resistencia a tierra del Sistema determina la relación entre la tensión de falla y la corriente a tierra, y la configuración de los electrodos determina la distribución del potencial en la superficie de la tierra, y esa distribución del potencial es de importancia ya que en el suelo puede ser tan alto que puede ser letal para una persona.

Esa distribución del potencial se controla usando las mallas de tierra, las cuales disminuyen la resistencia de tierra y las inductancias que se generan con corrientes de alta frecuencia.

Las mallas las forman normalmente conductores enterrados unidos entre sí con soldadura exotérmica o con conectores junto con varillas verticales.

Diagrama de bloques del procedimiento de diseño [IEEE std 80-2000]



OPTIMIZADO DE LA MALLA

Las mallas de tierra no regulares tienen las siguientes ventajas sobre las regulares:

- a) La densidad de corriente emanando de los conductores de la malla es mucho más uniforme.
- b) El espaciamiento desigual puede decrementar los gradientes de potencial sobre la superficie de la tierra, y mejorar el nivel de seguridad para la gente y equipos.
- c) Ahorra material

Para optimizar la malla, primeramente, se diseña una malla con cables igualmente espaciados utilizando los procedimientos del estándar IEEE Std 80-2000, haciendo los ajustes correspondientes a un terreno de dos capas. En seguida, manteniendo constante el número total y largo de los cables y varillas, se cambia el espaciamiento progresivamente minimizando la función de gradiente de voltaje.

Por último, se eliminan pares de cables del centro de la malla, siempre y cuando no se excedan los límites de seguridad de los voltajes de paso y contacto.

CERCA METÁLICA Y ESTRUCTURAS METÁLICAS DE LA SUBESTACIÓN

Se debe poner a tierra toda cerca metálica que se cruce con líneas suministradoras, a uno y otro lado del cruce, a una distancia sobre el eje de la cerca no mayor a 45m {921-29}. Las estructuras {921-28c}.

Se deberá tomar nota acerca de lo que se establece para las cercas de las subestaciones ya que pueden quedar dentro o fuera de la malla. Para ello se establece que:

- Cuando la cerca se coloca dentro del área de la malla, esta malla de tierra debe prolongarse 1.5 metros como mínimo fuera de la cerca. Conectar la cerca a la malla de tierra.
- En el caso de que la cerca se localice fuera de la zona de la malla, deberá estar como a 2 metros como mínimo del límite de dicha malla. Conectar la cerca de sus propios electrodos de tierra.

La regla general propone que la cerca metálica deberá conectarse únicamente a su propia tierra (sus propios electrodos). Excepto cuando los equipos aterrizados en la malla de tierra están a tan corta distancia que existe la posibilidad de que se toque la cerca metálica y el equipo aterrizado en la malla o la misma malla. En esta situación se deberá poner a tierra la cerca metálica con la malla de la subestación.

PARARRAYOS

Las puntas pararrayos se instalan sobre la parte más elevada de las estructuras de una subestación. Sirven para completar la red de cables de guarda que se extiende sobre la cúspide de las estructuras, para proteger a la subestación de las posibles descargas atmosféricas.

Dichos electrodos son de fierro galvanizado atornillados a la estructuras y cortados en bisel en su parte superior para producir el efecto punta.

TAREAS IDENTIFICADAS PARA CONSTRUIR LA MALLA DE UNA SUBESTACIÓN

- Comienza el trabajo de construcción en la subestación.
- Marcar físicamente en la tierra la malla.
- Excavar las trincheras de los cimientos y las especiales para enterrar los conductores de la malla de tierra.
- Enterrar los conductores de la malla de tierra.
- Hacer todas las conexiones requeridas.
- Enterrar las varillas electrodo.
- Conectar las varillas electrodo a la red.
- Rellenar y compactar todas las excavaciones.
- Unir las tuberías subterráneas y el acero estructural a la malla.
- Construir los edificios de la subestación e instalar los equipos.

- Conectar a la malla todas las estructuras metálicas, como transformadores e interruptores, los apartarrayos, marcos estructurales y la malla de la subestación.
- Aplicar una capa de alta resistividad como material de acabado.
- Medir la resistencia a tierra de la malla construida.
- Conectar los hilos de guarda a la malla

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

NORMA DE REFERENCIA NRF-011-CFE-2004

Paso 1:

Se debe de tener un plano de arreglo general de la subestación para determinar el área donde se debe instalar el sistema de tierra. Obtener el valor de la resistividad del suelo, para determinar el perfil de resistividad del suelo y el modelo de suelo necesario (suelo homogéneo o de dos capas).

Para iniciar el diseño del sistema de tierra no debe considerarse la inclusión en el terreno de sustancias químicas sino que éste sea el último recurso para mejorar los valores de resistividad en caso de requerirse.

Paso 2:

Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra y de la rejilla para tierra tierra, la corriente de falla I_{lo} 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 I_{lo} debe ser la máxima corriente futura.

Cálculo de la sección transversal del conductor de la rejilla para tierra tierra

Para calcular la sección transversal del conductor se debe tener el valor de la corriente máxima de falla a tierra que puede estar presente en el punto de la subestación. Conocidas el coeficiente de resistividad y las constantes características de cada material (véase tabla 1) Se aplican en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1

$$A_{mm}^2 = I \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}}$$

Ecuación 2

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}}$$

Donde:

A = Sección transversal del conductor en mm². (o también kcmil).

I = Corriente rcm en kA (debe de considerarse el incremento de este valor a futuro).

T_m = Temperatura máxima permisible en °C.

T_a = Temperatura ambiente en °C.

T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

α_o = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C.

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r en 1/°C.

ρ_r = Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r en μΩ-cm.

t_c = Tiempo de duración de la corriente en segundos.

TCAP = Factor de capacidad térmica por unidad de volumen (véase tabla 1) en J/(cm³/°C).

K_o = 1/α_o o (1/α_r) - T_r en °C.

TABLA 1 - Constantes de materiales

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α a 20 °C	K _s al 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusión T _m (°C)	ρ _r 20 °C (μΩ·cm)	Factor de capacidad térmica por unidad de volumen de volumen (d) TCAP [J/(cm ³ ·°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	10,8	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

Determinación de la Corriente máxima de 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, se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$I_g = S_f * I_f$$

Ecuación 4

$$I_f = 3I_0 \quad \therefore S_f = \frac{I_g}{3I_0}$$

Donde:

I_g := Corriente simétrica de rejilla en A.

I_f = Corriente simétrica de falla a tierra en A (valor rcm y debe considerarse el incremento futuro de este valor).

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.

I_0 = Corriente de secuencia cero en A.

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 la siguiente ecuación:

Ecuación 5

$$I_G = D_f * I_g$$

Ecuación 6

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

Donde:

I_G = Corriente máxima de rejilla en A.

I_g = Corriente simétrica de rejilla (valor rcm) 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 de reactancia (X) y de resistencia (R) en el punto de falla, véase tabla 2. 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.

T_a = Constante de tiempo subtransitoria en segundos.

$$T_a = \frac{X''}{WR}$$

Se presenta la tabla 2 de D_f para diferentes valores de X''/R .

Del siguiente rango la selección de t_f deberá corresponder a un menor tiempo de liberación de falla en subestaciones de transmisión y para subestaciones de distribución, tiempos de liberación de falla mayores.

Valores típicos de t_f se recomienda entre 0,25 a 1,0s. Un valor usual es de 0,5s

TABLA 2 - Valores típicos de factor de decremento D_f

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

Paso 3:

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:

Ecuación 7

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

Donde:

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

$S_B = 0,0135$ Constante empírica del impacto de energía tolerado, cuando se aplica aun por ciento de la población

t_s = tiempo máximo de liberación de la falla

Cálculo de la tensión de paso y tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano

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:

Ecuación 8

$$E_{paso} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{volts})$$

Ecuación 9

$$E_{contacto} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{volts})$$

Donde:

C_s = factor de reducción

ρ_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. El cálculo debe considerar el peso de 50 kg, por dar resultados más conservadores.

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

Ecuación 9

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left[1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right]}{2 h_s + 0.09}$$

Donde:

ρ = Resistividad del suelo en $\Omega\text{-m}$.

h_s = Espesor de la capa superficial en m

Paso 4:

El diseño preliminar debe incluir una Rejilla para tierra la cual esta 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 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. Se sugiere que la separación inicial de acuerdo a los niveles de tensión del sistema (en caso de no contar con programas de cálculo de red de Tierra) sea la siguiente:

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.

Disposición física

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).

En subestaciones tipo pedestal, se requiere que el sistema de tierra quede confinado siempre y cuando sea parte de un sistema de distribución multiaterrizado.

Las estructuras metálicas de la planta y de subestaciones, así como las partes metálicas de y 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.

Paso 5:

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 Ω o menor.
- Para subestaciones de potencia de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser entre 1 a 4 Ω ,
- Para subestaciones de distribución de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser como máximo de 5 Ω -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.

Ecuación 11

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

R_g = Resistencia de tierra en ohms.

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ω -m.

A = Área ocupada por la rejilla para tierra en m².

L_T = longitud total de los conductores enterrados en m.

- b) Para profundidades entre 0,25 y 2,5 m se requiere una corrección por profundidad.

Ecuación 12

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

Donde:

h = profundidad de la rejilla para tierra en metros.

- 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).

Ecuación 13

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

R_1 = Resistencia de los conductores de la rejilla para tierra en Ω .

R_2 = Resistencia de todos los electrodos verticales (varillas para tierra) en Ω .

R_{12} = Resistencia mutua entre el grupo de conductores,

R_1 y el grupo de electrodos verticales (varillas para tierra), R_2 en Ω .

Donde:

$R_1 = (\rho_1 / \pi l_1) [\ln(2l_1/h') + k_1 l_1 / (A)^{1/2} - k_2]$.

$R_2 = (\rho_a / 2n \pi l_2) [\ln(8l_2/d_2) - 1 + 2k_1 l_2 / (A)^{1/2} ((n)^{1/2} - 1)^2]$.

$R_{12} = (\rho_a / \pi l_1) [\ln(2l_1/l_2) + k_1 l_1 / (A)^{1/2} - k_2 + 1]$.

Donde:

ρ_1 = Resistividad del terreno con los conductores a una profundidad h , hacia abajo en Ω -m.

ρ_a = Resistividad aparente del terreno vista por la el electrodo vertical (varilla para tierra), en Ω m.

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

ρ_2 = Resistividad del terreno desde la profundidad H , hacia abajo en Ω -m.

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

l_2 = Longitud promedio de la 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.

Ecuación 14

$$h' = (d_1 h) / 2$$

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 "a x b" en metros.

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

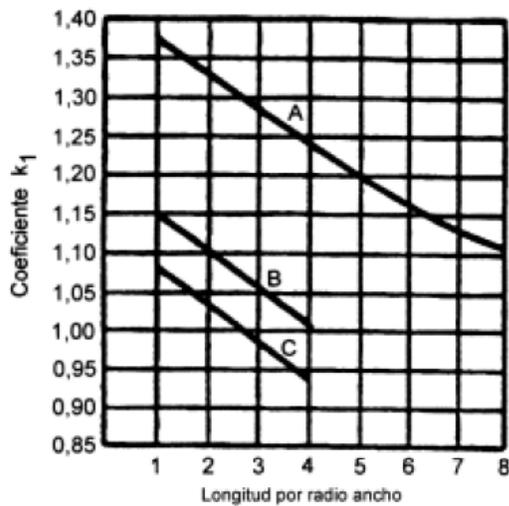
k_1, k_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema de tierra (véanse figuras 1 y 2).

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

d_2 = diámetro de la electrodos verticales (varilla de tierra) en m.

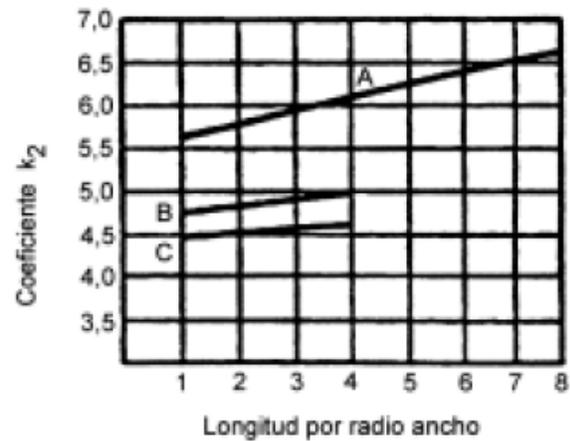
a = ancho de la rejilla para tierra en m.

b = largo de la rejilla para tierra en m.



Curva A - Profundidad $h = 0$
 Curva B - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$
 Curva C - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$

FIGURA 1 – Coeficiente k_1 de la fórmula de Schwarz



Curva A - Profundidad $h = 0$
 Curva B - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$
 Curva C - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$

FIGURA 2 – Coeficiente k_2 de la fórmula de Schwarz

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 ρ_1 / ρ_2 , la rejilla para tierra se localiza en la capa de resistividad ρ_1 , pero los electrodos verticales (varillas para tierra) están en contacto tanto con la capa de resistividad ρ_1 , como con la capa de resistividad ρ_2 , por lo que R_2 y R_{12} se calculan con una resistividad aparente ρ_a a vistas por los electrodos verticales (varillas para tierra):

Ecuación 15

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

Para suelos con resistividad uniforme:

$$\rho_1 = \rho_2$$

Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es muy grande, de preferencia ρ_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.

Los análisis computacionales basados en el modelado de las componentes del sistema de tierra en detalle, permiten calcular la resistencia con un alto grado de exactitud asumiendo que el modelo del suelo se selecciona correctamente.

Paso 6:

Determinación de la corriente máxima en la rejilla para tierra I_G .

A fin de evitar un sobredimensionamiento del sistema de tierra, para el diseño de la rejilla para tierra se utiliza únicamente la porción de la corriente de falla $3I_0$ que fluye a través de la rejilla para tierra hacia la tierra remota. Sin embargo la corriente máxima de la rejilla para tierra I_G debe considerar la peor localización y tipo de falla, el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema.

El cálculo de la corriente de la rejilla para tierra I_G se indica en el paso 2.

Paso 7:

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

Ecuación 16

$$GPR = I_G \times R_g$$

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.

Paso 8:

Calcular las tensiones de paso y de malla para el sistema de tierra propuesto.

Cálculo de la Tensión de Malla

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

Ecuación 17

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

Donde:

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ω -m.

K_m = Factor geométrico.(ecuación 18)

K_i = Factor de irregularidad (ecuación 21)

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 :

Ecuación 18

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

Donde:

D = Espaciamiento entre conductores paralelos en metros.

h = Profundidad de los conductores en la rejilla para tierra en metros.

d = Diámetro del conductor de la rejilla para tierra en metros.

K_h = Factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla. (Ecuación 19)

n = Número de conductores equivalentes en cualquier dirección.

Cálculo de K_{ii} :

$K_{ii} = 1$ para rejillas para tierra con electrodos verticales (varillas para tierra) a lo largo de su perímetro y/o en las esquinas, así como para mallas con los electrodos verticales (varillas para tierra) a lo largo del perímetro y dentro del área de la rejilla para tierra.

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

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

Cálculo de K_h :

Ecuación 19

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

Donde:

h = Profundidad a la cual esta enterrada la rejilla para tierra dada en metros.

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

Cálculo de n:

Ecuación 20

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

Donde:

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p}$$

Para rejillas para tierra cuadradas y rectangulares.

Donde:

L_p = Longitud de conductores en la periferia de la rejilla para tierra, dada en metros.

$n_b = 1$ Para rejillas para tierra cuadradas.

Para cualquier otro caso.

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

Donde:

A = Área de la rejilla para tierra en m².

$n_c = 1$ Para rejillas cuadradas y Rectangulares.

$n_d = 1$ Para rejillas cuadradas y rectangulares

Para la forma de rejilla para tierra en CFE

$$n = n_a n_b$$

El factor de irregularidad K_i

Ecuación 21

$$K_i = 0,644 + 0,148 * n$$

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:

Ecuación 22

$$L_m = L_c + (1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{(L_x^2 + L_y^2)^{1/2}} \right)) L_R$$

L_c = Longitud total de los conductores horizontales en la rejilla para tierra en metros.

L_r = Longitud de una sola electrodos verticales varilla de tierra en metros.

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

L_x = Longitud máxima de la rejilla para tierra en la dirección x dada en metros.

L_y = Longitud máxima de la rejilla para tierra en la dirección y dada en metros.

Cálculo de la Tensión de Paso

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

Ecuación 23

$$E_{\text{paso}} = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_s}$$

Véase significado de siglas en las fórmulas 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:

Ecuación 24

$$L_s = 0,75 L_c + 0,85 L_R$$

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:

Ecuación 25

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

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

3.3 Revisión del diseño

Paso 9:

Si la tensión de malla calculada es menor que la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, el diseño puede darse por concluido. De no ser así el diseño tiene que ser revisado (véase paso 11).

Paso 10:

Si ambas, la tensión de paso y de malla calculadas con el diseño preliminar son menores que las tensiones de paso y contacto tolerables por el cuerpo humano, el diseño necesita únicamente proporcionar la puesta a tierra de los equipos.

Paso 11:

Si se exceden los límites de las tensiones de paso o de contacto, se requiere que el diseño del sistema de tierra se revise. Estas revisiones pueden incluir el incrementar el área para el sistema de tierra, espaciamientos adicionales más pequeños entre conductores y varillas para tierra.

Paso 12:

Después de satisfacer los requerimientos de las tensiones de paso y de malla, se pueden requerir conductores adicionales de puesta a tierra para los equipos y algunos electrodos verticales (varillas para tierra). Los conductores adicionales a la rejilla para tierra se agregan cuando el diseño de la rejilla para tierra no incluye conductores cercanos al equipo que será puesto a tierra. Las electrodos verticales (varillas para tierra) adicionales pueden colocarse en la base de los apartarrayos, neutro de transformadores y otros equipos principales. El diseño final debe revisarse con el propósito de eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y otros riesgos asociados.