

SISTEMA DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

INTRODUCCIÓN

En el diseño y proyecto de las instalaciones destinadas al suministro o a la utilización de la energía eléctrica, una de las mayores preocupaciones de los ingenieros de diseño ha sido conectar a tierra los equipos eléctricos de una manera segura y apropiada.

Este problema existe en todos los campos de la ingeniería eléctrica, desde las bajas corrientes a tierra de los equipos electrónicos de estado sólido, hasta altas corrientes a tierra de las grandes subestaciones en extra alta tensión.

A causa de las altas corrientes de falla disponibles hoy en día, es esencial un buen sistema de tierra en todas las partes del sistema eléctrico, ya sea en subestaciones, líneas de transmisión o distribución o en equipos de baja tensión.

En las subestaciones eléctricas, uno de los aspectos principales para la protección contra las sobretensiones, ya sean de origen interno o externo, es el disponer de un adecuado sistema de tierras al cual se conecte el neutro de los equipos eléctricos y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial a tierra.

Un sistema de tierras efectivo para una subestación, consisten en forma típica de varillas, cables desnudos interconectados formando una malla y las conexiones a la estructura y partes metálicas de la subestación.

Un sistema de tierras efectivo incrementa la confiabilidad de la operación de un sistema eléctrico reduciendo las interrupciones de servicio causadas por transitorios, tales como son las descargas atmosféricas.

FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRA

- 1.- Proveer un medio seguro para proteger al personal en la proximidad de sistemas o equipos conectados a tierra, de los peligros de una descarga eléctrica bajo condiciones de falla.
- 2.- Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas a tierra, sin que se excedan los límites de operación de los equipos.

3.- proveer una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran (Ej. Transformador)

4.-Controlar las sobretensiones durante los transitorios.

5.- Disipación de las descargas atmosféricas

6.- Una operación correcta de los dispositivos de protección.

Quizás el propósito más importante de la conexión a tierra de los sistemas de potencia es proporcionar seguridad al personal de operación de las instalaciones, así como al público en general que tiene acceso a ellas. Para lograr esto, un sistema de tierras debe proporcionar una trayectoria a tierra de baja resistencia, así como suministrar precauciones adicionales para las áreas con riesgo que están sujetas al contacto humano.

El diseño del sistema de tierra es, de hecho, un asunto complicado, numerosos parámetros afectan el diseño y es frecuente que sea difícil obtener valores precisos de algunos de estos parámetros. Adicionalmente, las condiciones de temperatura y humedad pueden producir variaciones extremas en la resistividad de la tierra en la que se encuentra instalado el sistema de tierras, esto hace que el enfoque del diseño sea normalmente conservador, debido a que se tienen ciertas incertidumbres.

COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA

El sistema de tierra de una subestación se integra con los siguientes elementos:

- ✓ Conductores
- ✓ Varilla o electrodos de tierra
- ✓ Conectores o Juntas

CONDUCTORES

Sirven para formar el sistema de tierra y para la conexión a tierra de los equipos.

Los conductores empleados en los sistemas de tierras son generalmente cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados para su fabricación son el cobre, cobre estañado, copperweld (acero recubierto con cobre), acero, acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio.

El factor principal en la selección del material es la característica de corrosión que presenta al estar enterrado.

El cobre es la selección más común para los conductores, ya que tiene una buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión y a la fusión.

El calibre de los conductores, se determinara por requerimiento de conducción de corriente.

VARILLA O ELECTRODOS DE TIERRA

Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo.

Los materiales empleados en la fabricación de varillas o electrodos de tierra son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld.

Como en los conductores, la selección de material dependerá de las características de corrosión que presenten al estar enterrados.

El copperweld es el material más empleado en las varillas de tierra ya que combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, tiene buena conductividad, resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica para ser clavada en el terreno. El diámetro y longitud de las varillas o electrodos, se determinara por resistencia mecánica y por las características de resistencia eléctrica que presenten al estar enterrados.

CONECTORES O JUNTAS

Son los elementos que nos sirven para unir los conductores del sistema de tierra, para conectar las varillas a los conductores y para la conexión de los equipos, a través de los conductores al sistema de tierra.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son generalmente de dos tipos:

- Conectores a presión
- Conectores soldables

Los conectores a presión son todos aquellos que mediante presión mantienen en contacto a los conductores.

En este tipo están comprendidos los conectores atornillables y los de compresión.

Los conectores atornillables son aquellos que se fabrican formando dos piezas que se unen por medio de un tornillo. El material del conector es de bronce con alto contenido de cobre y el de los tornillo es de bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión.

Los conectores a compresión se fabrican de una sola pieza y mediante herramientas especiales se colocan para la unión de conductores.

Los conectores a presión deberán diseñarse para una temperatura máxima de 250 a 350 °C.

Los conectores soldables son aquellos que mediante una reacción química exotérmica, los conductores y el conector se sueldan en una conexión molecular. Este tipo de conector, por su naturaleza, soporta la misma temperatura de fusión del conductor.

Los conectores deberán seleccionarse con el mismo criterio que se seleccionan los conductores, además tendrán las siguientes propiedades:

- ✓ Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce en el al circular corrientes elevadas. (Resistente a la fusión)
- ✓ Tener suficientemente asegurados a los conductores para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por las fallas, además de no permitir que el conductor se mueva dentro de el.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TIERRA

Cada elemento del sistema de tierra deberá tener las siguientes características:

- ✓ Resistencia a la corrosión. Para retardar su deterioro en el ambiente donde se localice.
- ✓ Conductividad eléctrica. De tal manera que no contribuya sustancialmente con diferencias de potencial en el sistema de tierra.

✓ Capacidad de conducción de corriente. Suficiente para soportar los esfuerzos térmicos durante las condiciones más adversas impuestas por la magnitud y duración de las corrientes de falla.

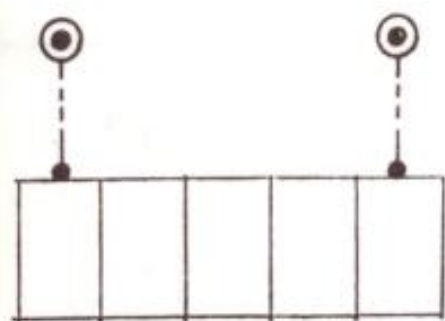
✓ Resistencia mecánica. De tal manera que soporte esfuerzos electromecánicos y daños físicos.

DISPOSICIÓN BÁSICA DE LAS REDES DE TIERRA

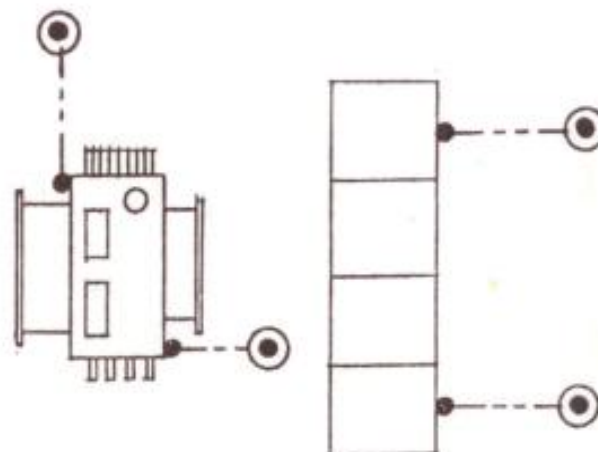
Se han considerado básicamente tres sistemas:

a) Sistema Radial

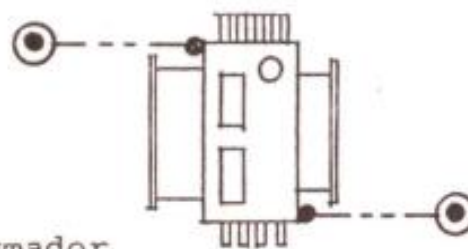
Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra a las cuales se conectan la derivación de cada uno de los equipos. El sistema radial es el menos seguro, ya que al producirse una falla en el equipo, se producen elevados gradientes de potencial.



Subestación



Tablero



Transformador

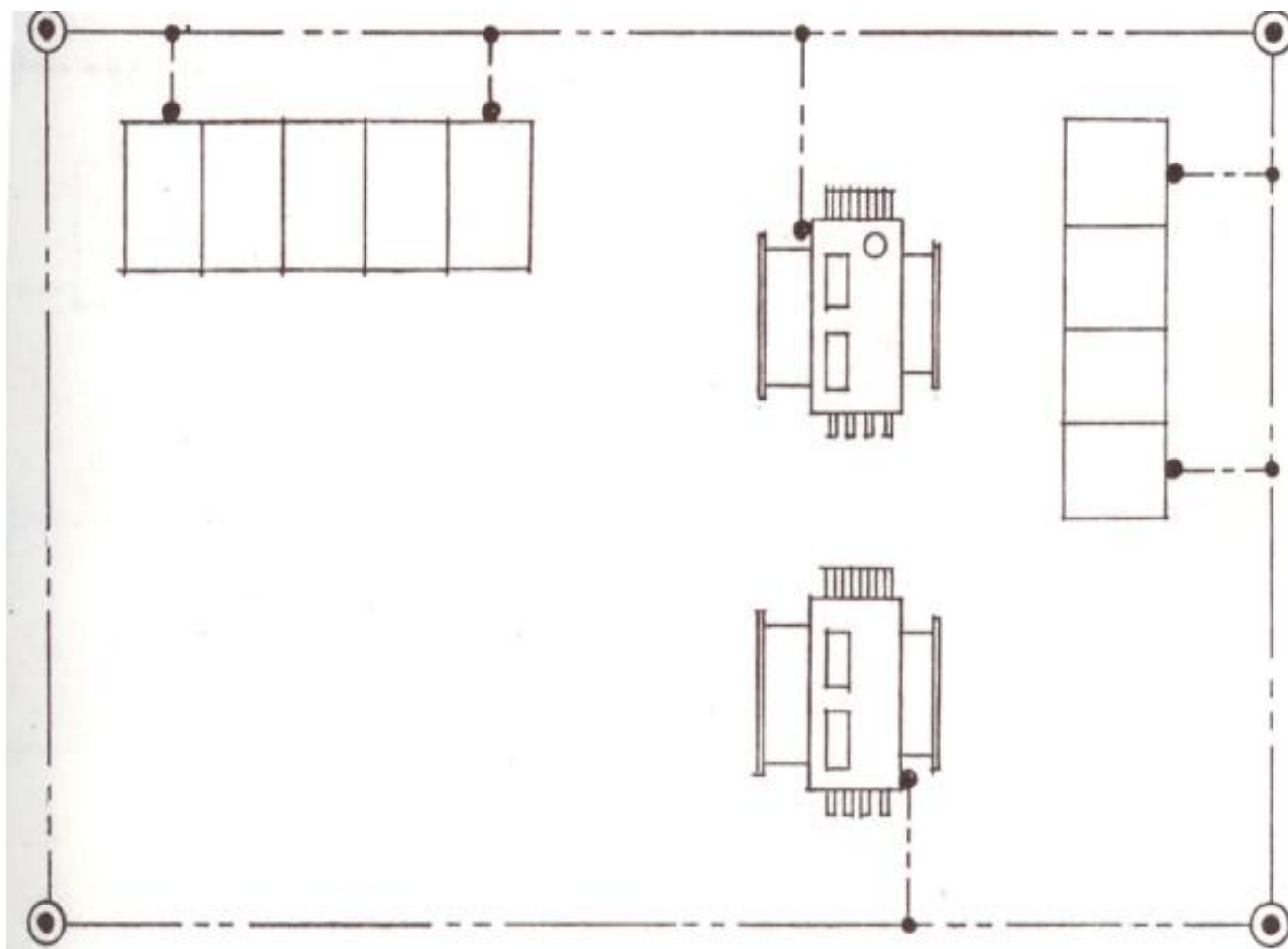
--- CONDUCTOR DE TIERRA

⊙ VARILLA DE TIERRA

• CONECTOR

b) Sistema en Anillo

Este sistema se obtiene colocando en forma de anillo un conductor de suficiente calibre alrededor de la superficie ocupados por los equipos de la subestación. Al anillo se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos usando un conductor un conductor de calibre más delgado. En los vértices del anillo se instalan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es más eficiente que el sistema radial, ya que los potenciales disminuyen al disiparse la corriente de falla por varias trayectorias en paralelo.



--- CONDUCTOR DE TIERRA

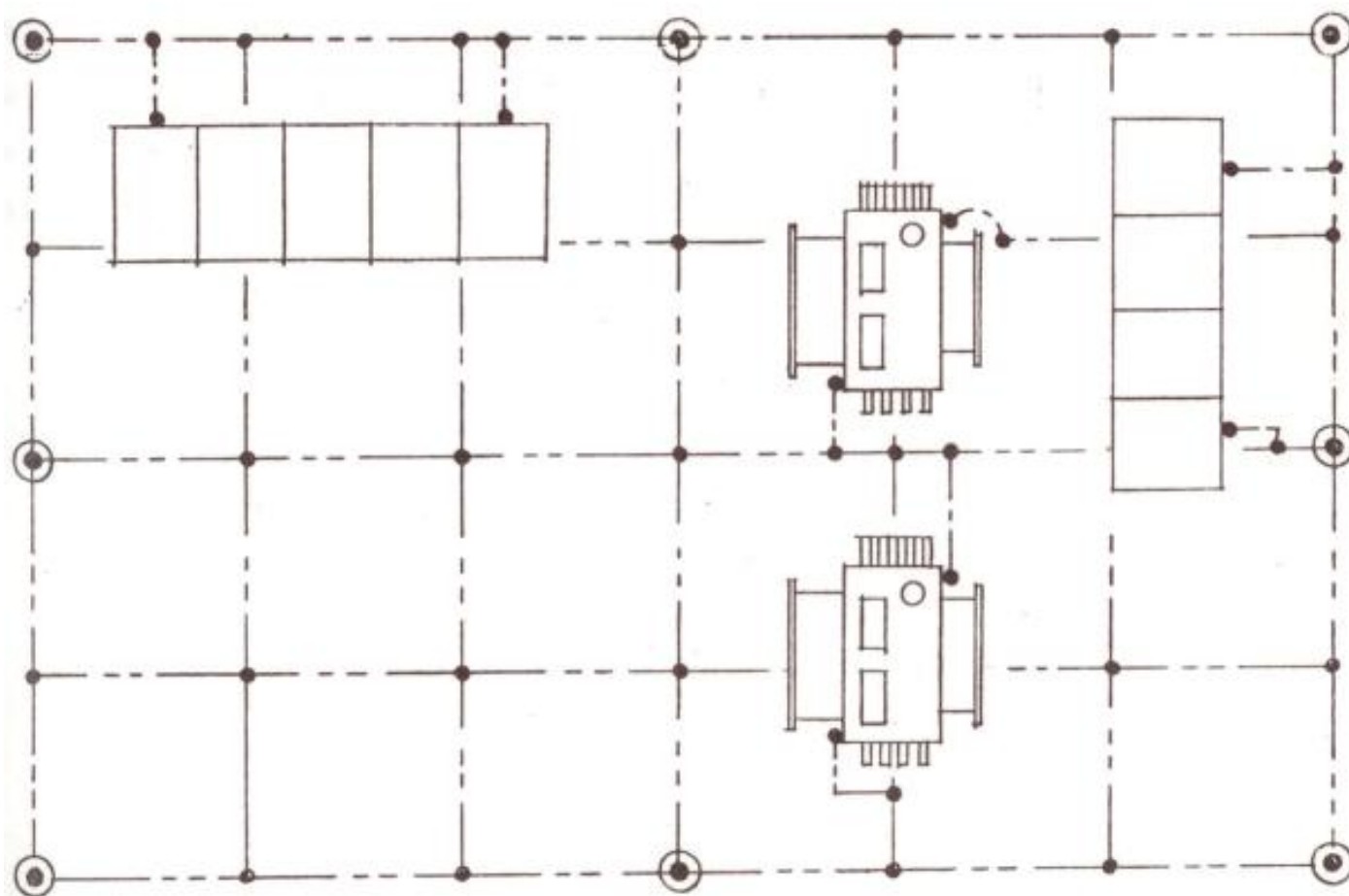
⊙ VARILLA DE TIERRA

• CONECTOR

c) Sistema de Malla

El sistema de malla es el más usado actualmente en las subestaciones eléctricas.

Consiste, como su nombre lo indica, en un arreglo de conductores perpendiculares formando una malla o retícula, a la cual se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. En el perímetro de la malla generalmente se colocan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es el más eficiente ya que se limitan los potenciales originados por la circulación de la corriente de falla.



--- CONDUCTOR DE TIERRA

⊙ VARILLA DE TIERRA

• CONECTOR

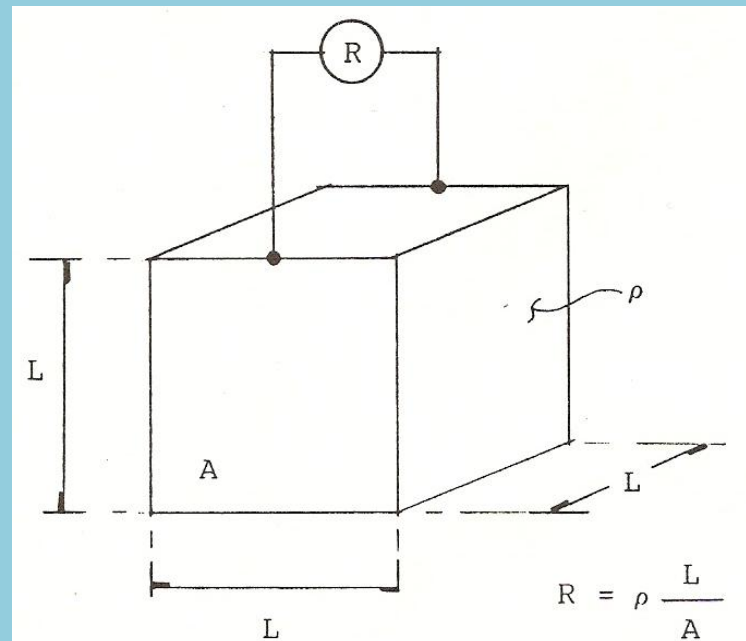
ANALISIS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO, MEDICIONES DE CAMPO Y SELECCIÓN DEL MODELO DEL SUELO

La resistividad eléctrica del suelo que rodea a una varilla o electrodo de tierra es uno de los parámetros más críticos que el diseñador tiene que determinar esto es debido a la gran influencia que tiene sobre la resistencia del electrodo y sobre los gradientes de voltaje en la superficie del área de la subestación.

Hay que recordar que el principal objetivo del diseño de una red de tierras es limitar estos parámetros a valores seguros.

Resistividad del terreno

La resistividad eléctrica o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga un área con sección transversal y longitud unitarias.



La resistividad del terreno para el diseño de una red de tierras, generalmente se determina por una interpretación apropiada de los datos de campo. Debido a que la resistividad del terreno varia tanto horizontal como verticalmente, los datos se conocen como “perfil de resistividad aparente del suelo”, los cuales se obtienen por pruebas en varios lugares de la subestación y hasta una cierta profundidad del terreno.

Efecto de la humedad, temperatura y contenido químico sobre la resistividad

La resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando la humedad se reduce a menos del 15% del peso de este. La cantidad de agua en el suelo depende del tamaño de las partículas y de su compactación. Sin embargo, como se muestra en la figura siguiente, la curva 2, la resistividad se afecta muy poco una vez que el contenido de humedad excede el 22%.

En la curva 3 de la figura siguiente, muestra la variación de típica de la resistividad del suelo con respecto a la temperatura para un terreno arcilloso que contenga 15.2% de humedad por peso.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo, puede considerarse despreciable para temperaturas arriba del punto de congelación. A 0°C el agua en el suelo se empieza a congelar y la resistividad se incrementa rápidamente.

La composición y la cantidad de sales solubles ó ácidos presentes en el suelo, pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva 1 de la figura No. 3, ilustra el efecto típico de la sal común (cloruro de sodio), sobre la resistividad del suelo al contener el 30% de humedad por peso.

$\Omega \cdot m$ 10 000

5000

1000

500

100

50

Curva 2

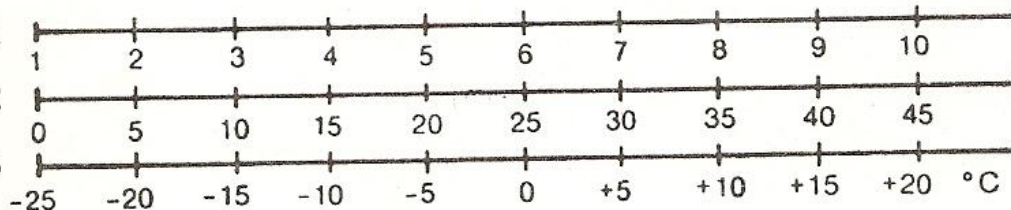
Curva 1

Curva 3

Curva 1

Curva 2

Curva 3



% Sal

% Humedad

Temperatura

Técnicas de medición de la resistividad.

La investigación en campo del lugar en que se va a ubicar una subestación, es esencial para determinar la composición general del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca de su homogeneidad. Las muestras de campo para los estudios de mecánica de suelo son muy útiles, ya que proporcionan información sobre las diferentes capas del subsuelo y los materiales que las componen, dándonos una idea del rango de su resistividad.

El valor de la resistividad del suelo que se usa en el diseño de la red de tierras, generalmente se determina con pruebas de campo en el lugar donde se ubicara la subestación.

Debido a que existen variaciones en el sentido horizontal y vertical en la composición del suelo, es conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno. La mayor cantidad de datos obtenidos en las pruebas, nos permitirá seleccionar con más precisión el modelo de suelo a usar en el diseño de nuestra red.

Existen 2 métodos para la medición de la resistividad en el terreno

a) Método de 4 puntas o método de wenner.

Este método es el más empleado para la medición de la resistividad promedio del terreno.

Se entierran pequeños electrodos a una profundidad “B” y espaciados sobre una línea recta a intervalos “A”.

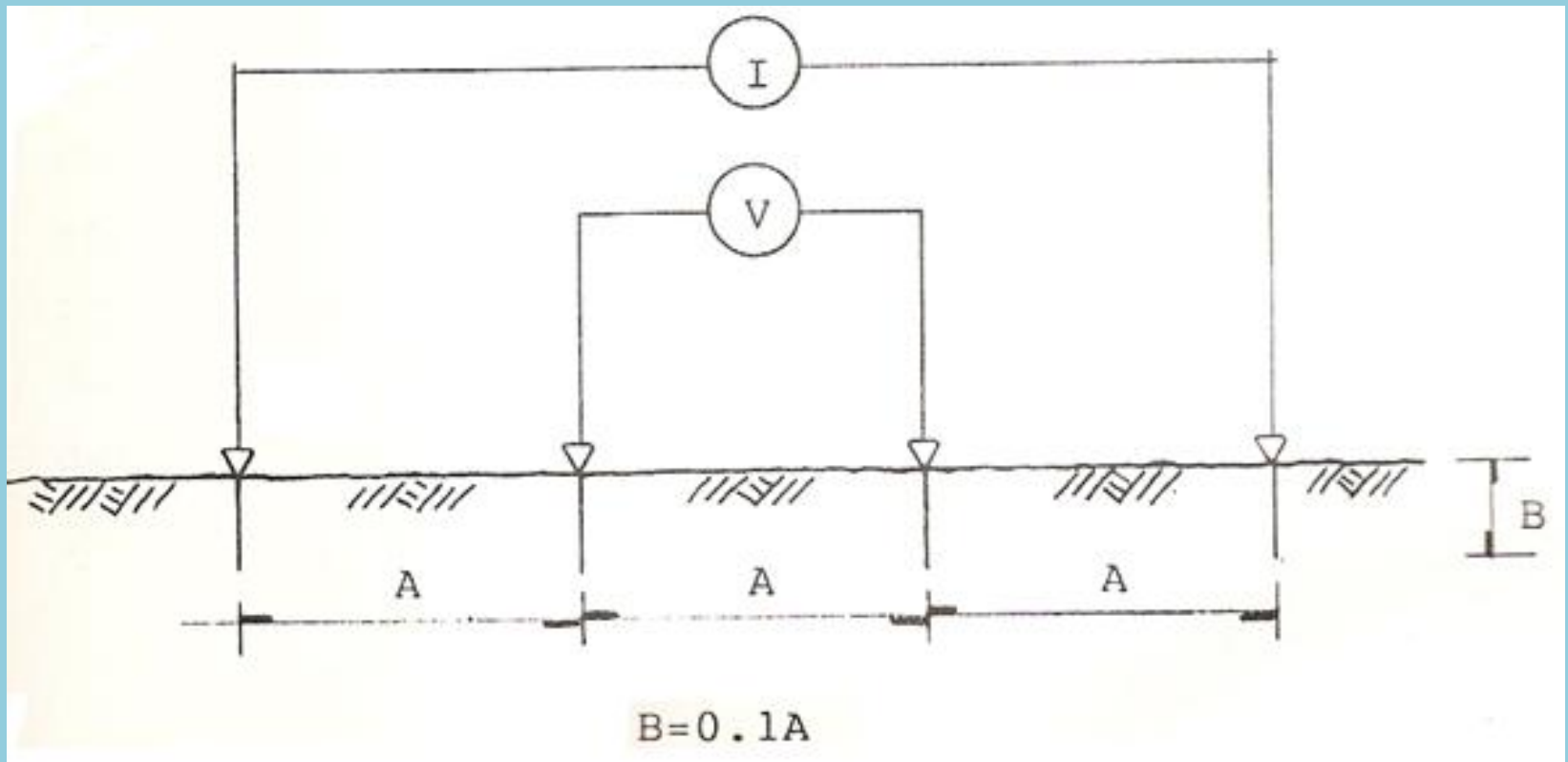
Se hace circular una corriente de prueba I entre dos electrodos interiores.

La relación V/I nos dará un valor de resistencia R en ohms.

Existen 2 variaciones en este método:

- electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner.

Con este arreglo, los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la siguiente figura:



Si “A” es la distancia entre dos electrodos adyacentes, la resistividad, en términos de las unidades de longitud en que “A” y “B” se midan, será:

$$\rho = \frac{4 \pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4 B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}}$$

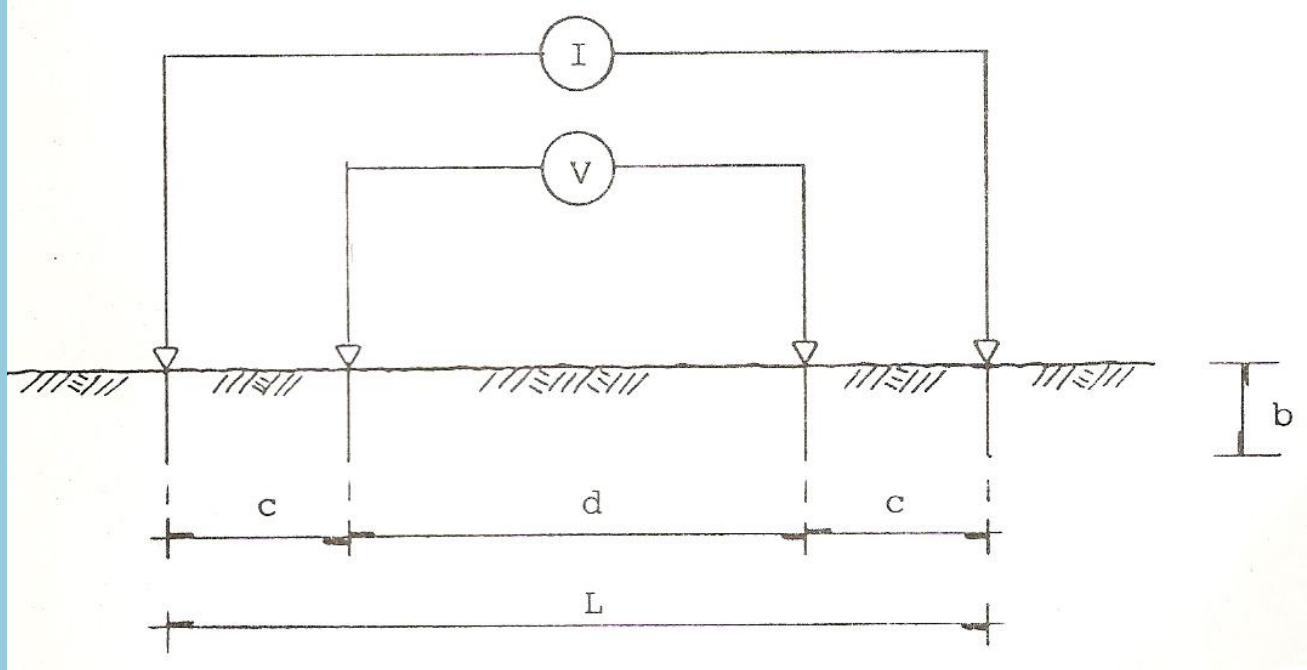
Si “A” y “B” se miden en cm. o en m. y a la resistencia R en ohms, la resistividad estará dada en ohms-cm o en ohms-m respectivamente. Si la longitud “B” es mucho menor que la longitud “A”, puede suponerse B=0 la formula se reduce a:

$$\rho = 2 \pi A R$$

Con estas formulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistencia aparente.

-Electrodos 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 entre los electrodos de corriente, para medir la resistividad puede usarse el arreglo mostrado en la siguiente figura:



Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La fórmula empleada en este 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:

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

Resistencia a tierra de una varilla

En un suelo uniforme de resistividad ρ , la resistencia a tierra de una varilla de diámetro d y enterrada a una longitud L , esta dado por la formula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{2.943L}{d} \right]$$

CORRIENTE MAXIMA DE LA MALLA, ANALISIS DE FALLAS, DIVISION DE CORRIENTES Y ASIMETRIA.

DETERMINACION DE LA CORRIENTE MAXIMA DE LA MALLA.

Para determinar el valor correcto de la corriente máxima de la malla I_G para el cálculo de la red de tierras de la subestación, se seguirán los siguientes pasos:

a) Evaluar el tipo y localización de aquellas fallas a tierra que probablemente producirán mayores flujos de corriente entre la malla y el terreno circundante. Produciendo la mayor elevación en el potencial de la malla con respecto a tierra (GPR) y los mayores gradientes de potencial en el área de la subestación.

b) Determinar por el cálculo, el factor de división de la corriente de falla S_f , para cada uno de los tipos de falla seleccionados en el inciso a) y establecer los valores correspondientes de corriente simétrica de malla, I_g .

c) Para cada uno de los tipos de falla y basado en su tiempo de duración (t_f), determinar el valor de factor de decremento D_f por los efectos de asimetría de la onda de la corriente de falla.

d) Seleccionar el valor más grande del producto $D_f I_g$ y por lo tanto la peor condición de falla; y establecer el valor del valor del factor de proyección C_p . para obtener los márgenes para crecimiento futuro del sistema

CORRIENTES SIMETRICAS DE FALLA.

Es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierras hacia el terreno que la rodea.

Puede expresarse como:

$$I_g = S_f I_f$$

Donde:

I_g = Corriente simétrica de malla en Amperes

I_f = Valor rms de la corriente simétrica de falla a tierra en Amperes

S_f = Factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla a la parte de esta corriente que fluye de la malla hacia el terreno.

CORRIENTE MAXIMA DE FALLA.

El valor de la corriente máxima de malla se define como:

$$I_G = C_p D_f I_g$$

Donde:

I_G = Corriente máxima de malla en Amperes

D_f = Factor de decremento para un tiempo de duración total de la falla t_f en segundos.

C_p = Factor de la proyección que toma en cuenta los incrementos relativos de la corriente de falla a lo largo de la vida útil de la instalación, cuando no existirán incrementos en la corriente de falla, $C_p = 1$.

I_g = Corriente simétrica de malla (valor rms) en Amperes,

EFECTO DE LA ASIMETRIA. FACTOR DE DECREMENTO.

La máxima corriente de falla I_G , como se describió en el punto anterior, es la máxima corriente asimétrica que fluye entre la malla de tierras y el terreno que la rodea.

Esta corriente incluye la corriente simétrica I_g , así como una corrección para la componente de corriente directa. Esta componente decae exponencialmente y se le conoce como desplazamiento de la corriente de C_d .

Ya que el diseño de la red de tierra debe considerar la corriente asimétrica, debemos encontrar un factor llamado de decremento D_f el cual tomara en cuenta el efecto de desplazamiento de la componente de C_d .

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left[1 - e^{-2t_f/T_a} \right]}$$

t_f = Duración de la falla en segundos

T_a = Constante de tiempo subtransitoria en segundos

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

La relación X''/R es la relación X/R en el punto de falla y para un determinado tipo de falla.

Se presenta la siguiente tabla para D_f y diferentes valores de X/R :

t_f (seg)	Ciclos 60Hz	Factor D_f			
		X/R =10	X/R =20	X/R =30	X/R =40
.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

FACTOR DE DIVISION DE LA CORRIENTE DE FALLA.

Se define como:

$$S_f = \frac{I_g}{3I_o} = \frac{I_g}{I_f}$$

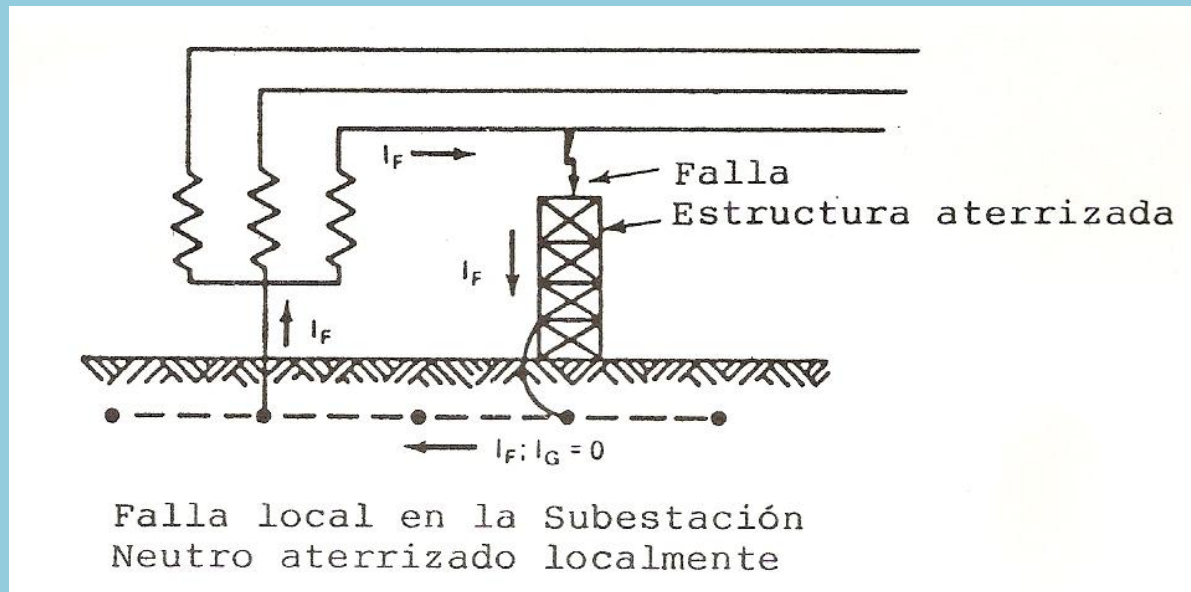
Donde:

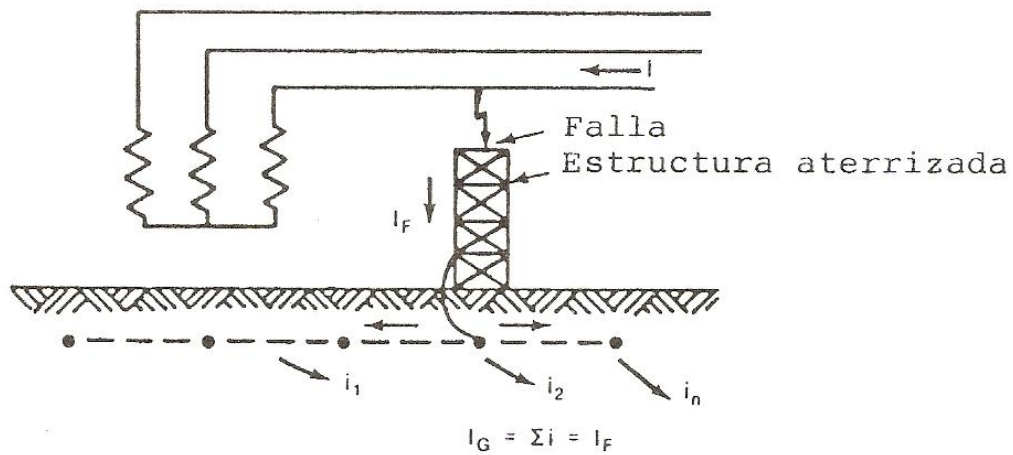
I_g = Corriente simétrica de malla

I_o = Corriente de secuencia cero en el punto de falla

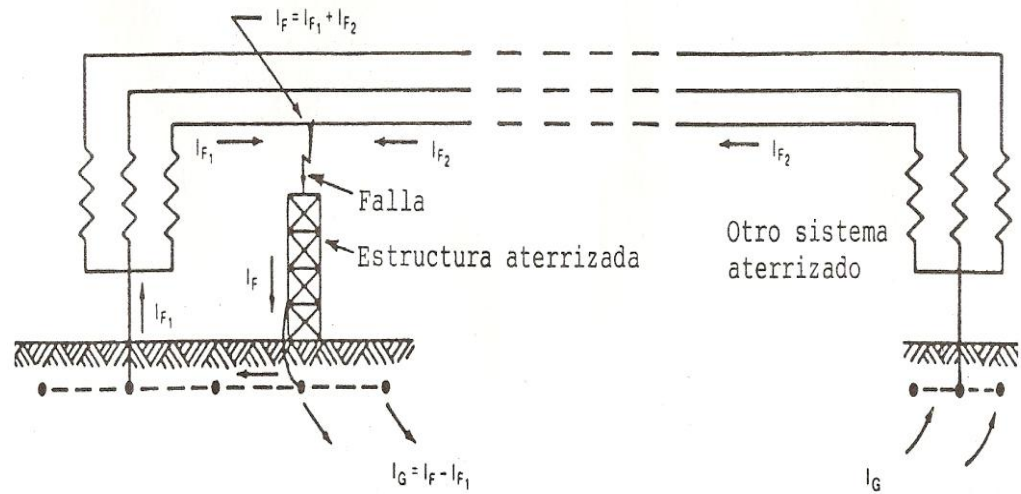
TIPOS DE FALLA A TIERRA

Pueden ocurrir diferentes tipos de falla en el sistema, pero desafortunadamente es difícil determinar el tipo de falla y su localización, estas, proporcionaran el mayor flujo de corriente entre la malla de tierras y el terreno que la rodea.





Falla local en la Subestación
Neutro aterrizado remotamente



Falla local en la Subestación, sistema aterrizado localmente
y en otros puntos

En la determinación de los tipos de falla, deberá considerarse la probabilidad de que esta ocurra. Para propósitos prácticos se recomienda que la investigación sobre máximas corrientes, se realice únicamente con la falla de línea a tierra (falla monofásica) y con la de dos líneas a tierra (falla bifásica a tierra).

Las formulas para calcularlas son:

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

Falla monofásica

$$I_0 = \frac{EX_2}{X_1(X_0 + X_2) + X_2X_0}$$

Falla bifásica a tierra

Donde:

I_0 = Corriente rms simétrica de secuencia cero en el punto de falla

E = Voltaje en el punto de falla

X_1 = Reactancia equivalente de secuencia positiva en el punto de falla

X_2 = Reactancia equivalente de secuencia negativa en el punto de falla

X_0 = Reactancia equivalente de secuencia cero en el punto de falla

EFECTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA

En la mayoría de los casos, es suficiente calcular la corriente máxima de malla I_G como se describió anteriormente, despreciando las resistencias de los elementos del sistema eléctrico, la resistencia a tierras de la malla y la impedancia de la falla. El valor se introduce en los cálculos es despreciable dando más margen de seguridad a la red, ya que la corriente calculada es ligeramente mayor.

RESISTENCIA A TIERRA

Un sistema de tierras deberá proveer una resistencia a tierra con valores cercanos a cero; en la practica la elevación de potencial a tierra en el lugar de la subestación se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla, a altas corrientes se deberá tener un valor muy bajo de resistencia a tierra del sistema.

Para subestaciones de potencia es recomendable tener valores de resistencia a tierra cercanos a 1 ohm o menos; mientras que en la subestación de distribución un rango aceptable es de 1 a 5 ohms dependiendo de las condiciones locales

CALCULOS SIMPLIFICADOS

El valor estimado de la resistencia a tierra es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el arreglo básico del sistema de tierras. A primera vista esto puede parecer difícil; el sistema de tierras todavía no está diseñado y su resistencia es desconocida.

Afortunadamente la resistencia depende en primer lugar del área ocupada por el sistema de tierras, la cual es conocida desde que se inicia el diseño.

Como primera aproximación, el valor mínimo de la resistencia a tierra en la subestación en suelo uniforme puede estimarse por medio de la formula de una placa metálica circular una vez que se ha determinado la resistividad del suelo.

La ecuación 1 se usara solamente cuando se requiera un valor estimado de la resistencia a tierra.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad \dots 1$$

Donde:

R_g = Resistencia a tierra en Ohms

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ohm-metro

A = Area ocupada por la malla de tierra en m^2

Puede obtenerse un valor límite de la resistencia agregando

Un término de la fórmula anterior:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad \dots 2$$

Donde L es la longitud total de conductores enterrados de la red en m

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema que consiste en un número de conductores es mucho mayor que el formado por una placa sólida, y que esta diferencia decrecerá cuando se incremente la longitud de los conductores enterrados, aproximándose a cero cuando L sea infinita, alcanzándose la condición de placa sólida.

Las ecuaciones anteriores pueden emplearse con razonable precisión para profundidades de la red menores a 0.25 metros.

Para profundidades entre 0.25 y 2.5 metros se requiere una corrección por profundidad:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right] \dots 3$$

Donde h es la profundidad de la malla en metros.

Las ecuaciones 2 y 3 son de gran ayuda para calcular la elevación de potencial para evaluar un diseño preliminar y determinar la longitud aproximada de conductores enterrados que se necesitan para el control de los voltajes de paso y de contacto.

CALCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

Los efectos que produce una corriente eléctrica al circular a través de partes vitales del cuerpo humano, dependen de la duración, magnitud y frecuencia de esta corriente.

La consecuencia más peligrosa por estar expuesto al paso de la corriente eléctrica es la fibrilación ventricular, una condición de acción no coordinada de los ventrículos del corazón que da como resultado el paro inmediato de la circulación de la sangre.

Efecto de la frecuencia

El cuerpo humano es muy vulnerable a los efectos de la corriente eléctrica de 50 o 60 Hz. En estas frecuencias una corriente de con una magnitud de 100 mA puede resultar letal.

De estudios realizados, se ha observado que el cuerpo humano puede tolerar mayores corrientes a frecuencias de 25Hz o a la corriente directa o a las frecuencias en el rango de 3000-10000Hz.

Efectos de la magnitud y duración.

Los efectos fisiológicos más comunes que se presentan al ir incrementando la corriente eléctrica que circula por el cuerpo son:

- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| +Percepción. | +fibrilación ventricular. |
| +Contracción muscular. | +Paro respiratorio. |
| +Perdidas del conocimiento. | +Quemaduras. |

La corriente de 1mA está reconocida generalmente como el umbral de la percepción, esto es, la magnitud de la corriente a la cual una persona es capaz de detectar una ligera sensación de picazón en las manos o en la punta de los dedos, por el paso de la corriente.

Las corrientes de 1 a 6 mA, a menudo denominada “corriente de soltar”, aunque desagradable mantener, generalmente no daña la habilidad de la persona sujeta al objeto energizado, de controlar sus músculos y soltarse.

En el rango de 9 a 25 mA, las corrientes pueden ser dolorosas y hacer imposible o difícil soltar el objeto energizado. Para corrientes más altas, las contracciones musculares pueden dificultar la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente se interrumpe; a menos que la contracción sea muy severa y la respiración se detenga, no por segundos sino por minutos, en algunos casos el cuerpo humano responde con resucitación cardiopulmonar, (RCP).

No es sino hasta que la magnitud de la corriente alcanza un rango de 60 a 100 mA, cuando puede ocurrir la fibrilación ventricular, paro cardíaco o paro respiratorio y causar la muerte.

Al enfatizar la importancia del umbral de fibrilación las corrientes pueden mantenerse por debajo de este valor mediante un cuidadoso diseño en el sistema de tierras.

Limites de corriente permisible por el cuerpo humano.

La magnitud y duración de la corriente que circula por el cuerpo humano deberá ser menor que aquella que cause fibrilación ventricular.

La duración para la cual una corriente de 50 a 60 Hz puede ser tolerada por la mayoría de las personas, está relacionada con su magnitud y rango de duración 0.03 a 3 segundos que no produce fibrilación, está relacionada con energía absorbida por el cuerpo y se describe en la siguiente ecuación:

$$(I_B)^2 t_s = S_B \quad \dots \quad 8$$

Donde:

I_B = Magnitud rms de la corriente que fluye por el cuerpo
 t_s = Duración del flujo de corriente en segundos
 S_B = Constante empírica relacionada con la energía tolerada por un cierto porcentaje de una población dada.

De estudios realizados, se supone que el 99.5% de las personas pueden soportar de manera segura, sin fibrilación ventricular, el paso de una corriente en magnitud y duración, determinada por la siguiente fórmula:

$$I_B = k/\sqrt{t_s} \quad \dots \quad 9$$

Donde, en adición a los términos previamente definidos por la ecuación 8:

$$k = \sqrt{S_B}$$

La energía que puede soportar el 99.5% de las personas con peso aproximado de 50 kg (110 lb.) da como resultado un valor de S_B igual a 0.0135 entonces $K_{50}=0.116$ y la fórmula para la corriente permisible por el cuerpo es:

$$I_B = 0.116/\sqrt{t_s} \quad \dots \quad 10$$

Para las personas con peso aproximado de 70 Kg. (155 lb.) se ha determinado un valor de $SB = 0.0246$ y $k_{70} = 0.157$ entonces la formula queda:

$$I_B = 0.157 / \sqrt{t_s} \quad \dots \quad 11$$

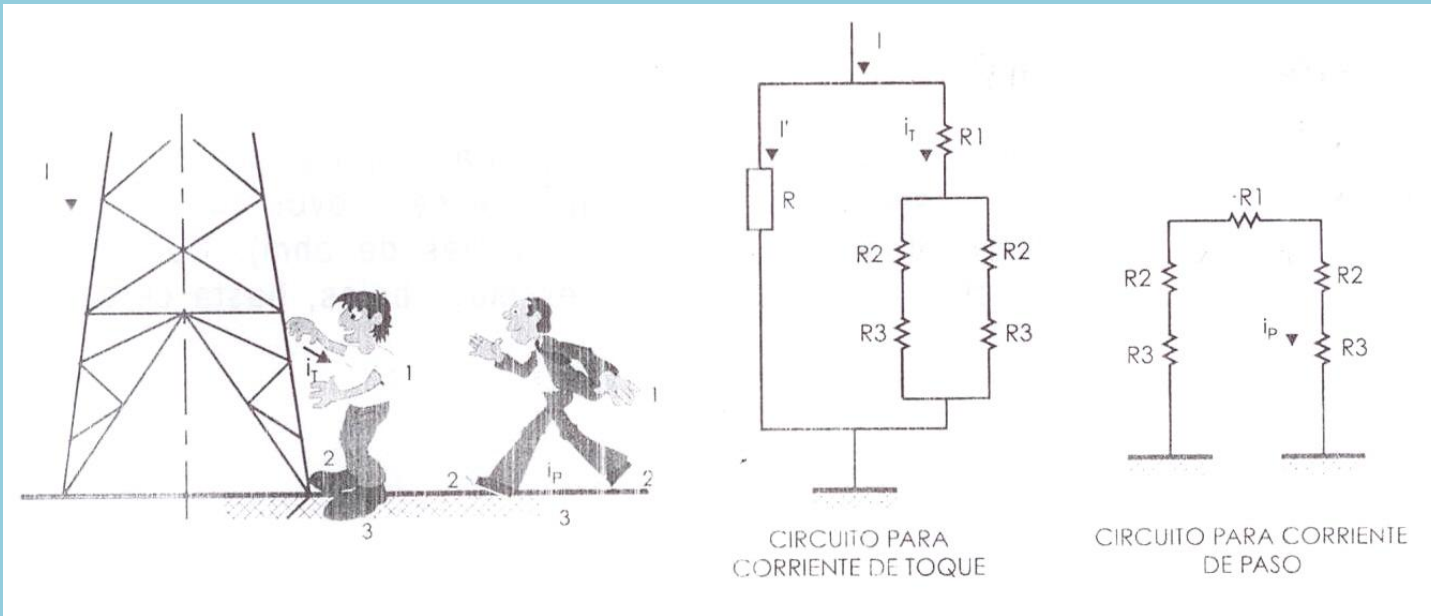
Este valor puede considerarse típico para los cálculos, ya que la mayoría de la población tiene peso alrededor de los 70 kg.

Resistencia del circuito de choque

Cuando se proyecta un sistema de conexión a tierra para corrientes a la frecuencia industrial (50/60 Hz), se debe verificar una corriente eléctrica que circulara por el cuerpo humano, tomando posesión en las localidades mas desfavorables o mas probables.

Para esto, es necesario conocer con razonable precisión una resistencia eléctrica que se opone a esa corriente, o sea, con valores máximos admisibles de corriente de choque en cada situación.

En la siguiente figura, se muestran los circuitos equivalentes para representar las llamadas tensiones de paso y contacto:



De los circuitos anteriores se tiene:

R_1 = Resistencia del cuerpo humano incluyendo los contactos de manos y pies

R_2 = Resistencia de los zapatos

R_3 = Resistencia de contacto pie-suelo

CALCULO DE POTENCIALES.

POTENCIAL DE PASO TOLERABLE.

$$E_{\text{paso}_{50}} = (1000 + 6C_s(h_s, K)\rho_s)0.116/\sqrt{t_s} \quad \dots \quad 24$$

$$E_{\text{paso}_{70}} = (1000 + 6C_s(h_s, K)\rho_s)0.157/\sqrt{t_s} \quad \dots \quad 25$$

POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE.

$$E_{\text{cont}_{50}} = (1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s)0.116/\sqrt{t_s} \quad \dots \quad 26$$

$$E_{\text{cont}_{70}} = (1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s)0.157/\sqrt{t_s} \quad \dots \quad 27$$

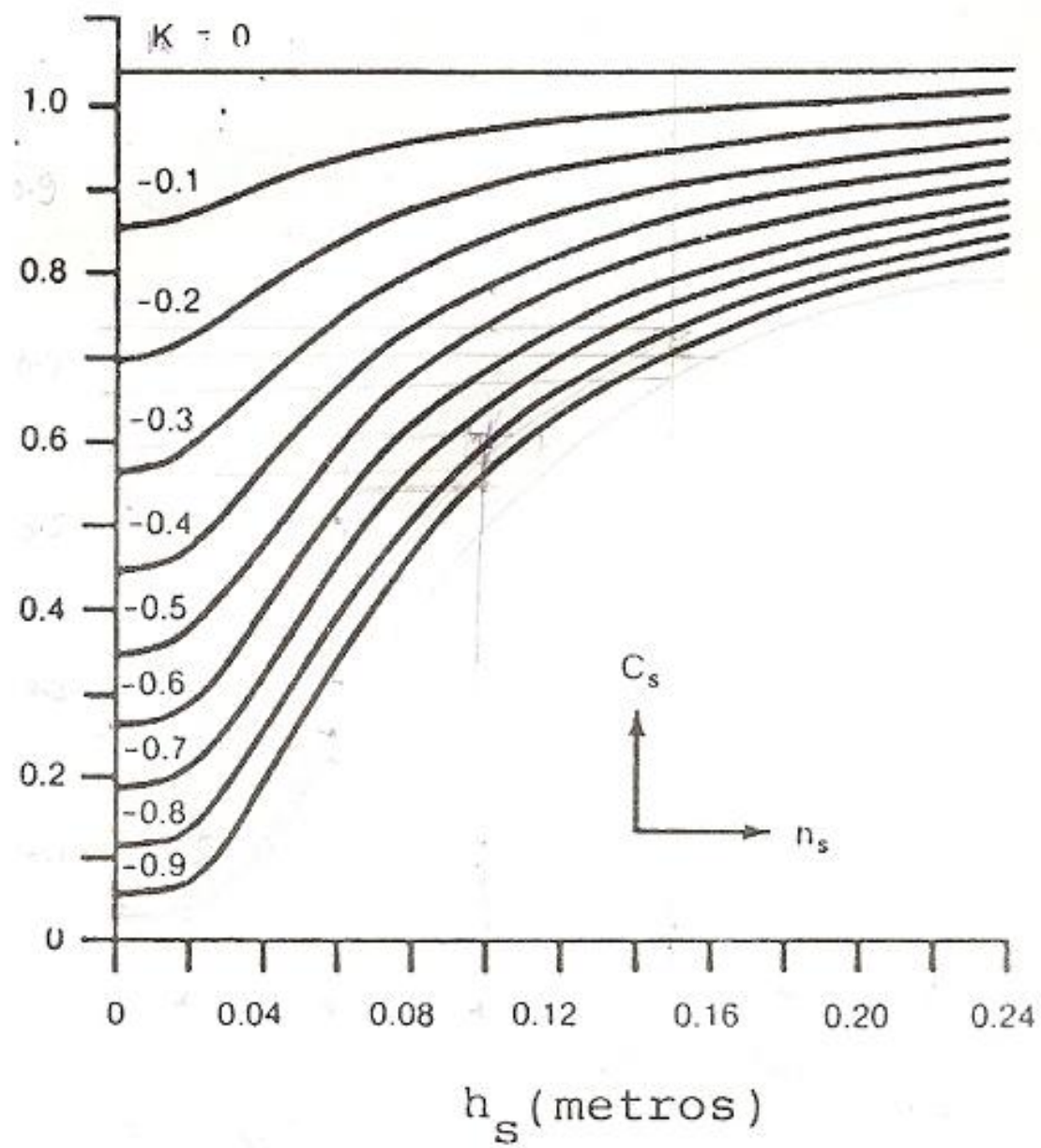
Donde:

$C_s = 1$ Para cuando no existe una capa superficial en la subestación ó determinado a partir de la figura 13 cuando se tenga una capa superficial de alta resistividad y pequeño espesor.

$\rho_s =$ Resistividad del material de la superficie en Ohms-metro

$t_s =$ Duración de la corriente en segundos.

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



CALCULO DE LA SELECCION DEL CONDUCTOR.

Los conductores empleados en el sistema de tierras serán capaces de soportar la máxima corriente de falla durante un tiempo determinado sin llegar a la fusión.

La ecuación que evalúa la ampacidad de cualquier conductor del cual se conocen las constantes de su material es:

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

Donde:

I = Corriente rms en Kiloamperes

A = Sección transversal del conductor en mm²

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

α₀ = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r

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

K₀ = 1/α₀ , δ (1/α_r) - T_r

t_c = Tiempo de duración del flujo de corriente en segundos

TCAP = Factor de capacidad térmica en J/cm³/°C

Nótese que α_r y ρ_r están dados en la misma temperatura de referencia. Se muestran las constantes de los materiales en la tabla 1.

Si el tamaño del conductor esta dado en Circular Mils la ecuación se modifica a:

$$I = 5.0671 \cdot 10^{-6} A \sqrt{\left(\frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}$$

Description	Material Conductivity (%)	α_r Factor @ 20 °C	K_0 ($1/\alpha_0$) @ 0 °C	Fusing Temperature (°C)	ρ_r @ 20 °C ($\mu\Omega\text{-cm}$)	TCAP Factor Effective Value ($\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1084/ 1300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1084/ 1300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminum Alloy Wire 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminum-Clad Steel Core Wire	20.3	0.00360	258	660/ 1300	8.4805	2.670
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.00320	293	419/ 1300	20.1	3.931
Stainless Steel No 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Constantes de Materiales

Las ecuaciones anteriores pueden ordenarse de tal manera que se calcule el tamaño o calibre del conductor requerido en función de la corriente:

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \cdot 10^4}{\text{TCAP}}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

$$A_{\text{cmils}} = 1973.52 I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \cdot 10^4}{\text{TCAP}}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

Se asumen los siguiente parámetros de diseño:

Temperatura Ambiente 40 °C.

Limite de temperatura de fusión como el dado en la tabla

Temperatura máxima permisible para las juntas o uniones soldadas 450 °C

Temperatura máxima permisible para juntas o uniones a presión 250°C

CALIBRE Y DIAMETRO DE CONDUCTORES.

CALIBRE		DIAMETRO CONDUCTOR	
Circular Mills.	A.W.G.	Pulgadas	milímetros
1,000,000		1.152	29.26
800,000		1.031	26.18
750,000		.998	25.35
700,000		.964	24.48
600,000		.893	22.68
500,000		.813	20.65
400,000		.728	18.49
350,000		.681	17.29
300,000		.630	16.00
250,000		.575	14.60
211,600	4/0	.528	13.41
167,800	3/0	.470	11.93
133,100	2/0	.419	10.64
105,500	1/0	.373	9.47
83,690	1	.332	8.43
66,370	2	.292	7.41
52,630	3	.260	6.60
41,740	4	.232	5.89
26,240	6	.184	4.67
16,510	8	.146	3.70
10,380	10	.116	2.94
6,530	12	.0915	2.32
4,110	14	.0726	1.84

En la practica, los requerimientos de confiabilidad mecánica determinaran el calibre mínimo del conductor. Las primeras guías del AIEE e IEEE recomiendan un calibre mínimo de 1/0 y 2/0 de conductor de cobre para juntas soldadas o atornilladas respectivamente. Un reciente estudio internacional, ha demostrado que cerca del 66 % de las utilidades cuestionadas usan conductor de cobre calibre 4/0 AWG para la red y aproximadamente el 16 % prefiere usar conductores tan grandes como 500 kcm. Por otro lado, cerca del 25 % de las utilidades, reporten el uso de conductores de cobre tan pequeños como 1/0 AWG sin presentar problemas mecánicos.

Ejemplo de Calculo