



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INGENIERIA ELECTRICA

**Estudio de red de tierras
de subestación "Angostura"
de 400kv/115kv**

Residencia profesional en C.F.E. (Protección y Medición)

Jordán Romero Dillmann

Asesor en C.F.E.

Ing. Fidel Abdías Pozo Aguilar

Asesor en I.T.T.G.

Ing. Abraham Ocampo Solórzano

Tuxtla Gutiérrez; Chiapas, 2013



1.- Introducción

1.1 Antecedentes

La oposición que se presenta a la circulación de la corriente de falla a tierra se llama resistencia a tierra, lo que se pretende con una red de tierra es que esta tenga la capacidad de disipar toda la corriente, para ello se debe contar con poca impedancia en la tierra de acuerdo con los reglamentos que la C.F.E. y el IEEE determinen, ya que ellos establecen los criterios de diseño en base a normas y diseños para ciertos tipos de capacidades en subestaciones. Cuando se realizan las evaluaciones de las características de un sistema de tierra seguro, no se deben utilizar números redondeados puesto que entre más cifras significativas tenga los cálculos, mayor será la precisión de este mismo, asegurando con esto que el sistema no presente configuraciones irregulares.

La red de tierra de una subestación se construye con cables de cobre desnudos interconectados por medio de conectores, formando mallas y con las varillas de tierra que la conforman en general. En el diseño de una subestación eléctrica es necesario definir diversas conexiones a tierra (puesta a tierra) para conectar a la propia red de tierra los neutros, tanques y carcasas de los equipos, los cables de guarda, las estructuras metálicas y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

Los diversos componentes del suelo determinan el valor de la resistividad del terreno, por lo tanto cuando se tiene una resistividad alta se consideran un mal conductor y a su vez un buen aislante. La resistividad de un material puro es una característica del mismo que depende de su estado cristalino y temperatura y, las variaciones de su estructura cristalina debido a tratamientos térmicos, deformaciones mecánicas o impurezas, pueden afectar considerablemente su resistividad.

El procedimiento de diseño que se describe corresponde a la Standard 80-2000 de la IEEE y a la norma de CFE NRF-011 que permite obtener niveles seguros de tensiones de paso y de toque dentro de la subestación (área cercada) y en sus proximidades. Puesto que la tensión de malla representa la peor tensión de toque posible dentro de la subestación (excluyendo los potenciales transferidos), esta clase de tensión se usará como base para el diseño.

Las tensiones de paso son menos peligrosas que las tensiones de malla, debido a que se debe instalar una capa superficial de alta resistividad, pero esta capa no se



extiende por fuera de la subestación, donde las tensiones de paso pueden ser peligrosas. En cualquier caso, las tensiones de paso y de toque calculadas deben ser menores que las tensiones de paso y de toque tolerables por el cuerpo humano.

1.2 Estado del arte.

Se tiene referencia de algunas empresas que se dedican al diseño y construcción de proyectos de subestaciones de alta tensión en las cuales es necesaria la red de tierra.

Subestaciones, .S.A. de C.V. se funda en la Cd. De Monterrey N.L. México desde el 9 de Octubre de 1969 por el Ing. Roberto Sánchez Murillo Egresado y Catedrático del ITES. Cuya actividad principal es la fabricación e instalación de Equipo Eléctrico de Alta Tensión.

Este hecho marcó profundamente la posterior andadura de una empresa de equipo eléctrico que durante más de 35 años de su existencia ha desarrollado y ejecutado dentro del sector del ramo a nivel nacional una lista de más de 700 obras.

Atravez de un equipo de especialistas garantiza a sus clientes una línea de productos de alta calidad y un servicio personalizado el cual tiene la misión de elaborar planes y proyectos que sean de mayor beneficio para el cliente.

Delta transformadores es una empresa que contribuye con sus productos y servicios a eficientar los consumos de energía de los usuarios así como también fomentar la construcción de subestaciones eléctricas para que estos tengan un ahorro muy significativo en el pago de su recibo de luz y así mismo ayuden a la creación de energía eléctrica del país.

Delta transformadores brinda los servicios de Fabricación, Venta, instalación y mantenimiento de las siguientes Subestaciones: Subestaciones de azota, subestaciones de poste, subestaciones de pedestal y subestaciones encapsulada

Subestaciones Delta ofrece la seguridad de ahorro en corto plazo, y beneficiar por décadas a sus clientes, ya que la calidad, garantía, pólizas de mantenimiento e ingenierías de sus productos y servicios respaldan al mismo.

1.3 Justificación

Una buena conexión a tierra, abate el costo del equipo utilizado, minimiza el radio de interferencias y reduce los niveles de aislamiento de los equipos (tensión de



aguante al impulso) y la magnitud de la estabilidad transitoria y consecuentemente brindará una protección eficaz a estos.

La Red de tierra cumple tres funciones básicas en una subestación:

- a) Dar seguridad al personal que esté dentro del predio de la subestación o en su periferia, evitando la elevación a valores peligrosos para la vida humana, de las tensiones de toque y de paso.
- b) Protección del equipo eléctrico, evitando que el gradiente de potencial en la subestación se eleve a valores peligrosos para el equipo al ocurrir una descarga (falla) eléctrica en la subestación.
- c) Servir como medio de aterrizamiento físico, para maniobras con fines de mantenimiento de equipo eléctrico.

La seguridad del personal de operación, así como de las personas que lleguen a estar en contacto con los perímetros de la subestación es el factor principal para el diseño de la red de tierra, tanto en situaciones normales como de contingencia. Además se debe garantizar que las fallas tengan un retorno efectivo y suficiente por tierra hacia los neutros de los transformadores que alimenten la falla, para que los esquemas de protección actúen en el mínimo de tiempo, limitando los daños.

En los sistemas eléctricos el método de aterrizamiento puede determinar las magnitudes de sobre tensiones tanto en estado estable como en estado transitorio. Los sistemas no aterrizados están sujetos a sobre tensiones muy elevadas que reduce la vida de los equipos, principalmente en transformadores y maquinas rotatorias.

La corriente de falla a tierra total, provoca elevación en el potencial, y cuando se encuentra en cables con pantalla, neutros aterrizados, barras aisladas de gas SF6 (subestación encapsuladas), alimentadores subterráneos, etc., se provee una trayectoria de muy baja impedancia en paralelo de retorno hacia la fuente, que abate la magnitud de las sobre tensiones esperadas.

1.4 Objetivo

Conocer los criterios y requerimientos bajo un estudio de la Subestación Eléctrica Angostura de 400KV / 115KV, para analizar la forma correcta en la que se construye una red de tierra en subestaciones de dicha capacidad, bajo los reglamentos establecidos de la C.F.E. y conjuntamente con los que establece el



IEEE para su correcto funcionamiento, así como también comparar los cálculos que dicha subestación tiene en su diseño, con los cálculos desarrollados en el presente para su análisis.

1.5 Metodología ; diagrama de bloques

Paso 1: Se debe de tener el plano del arreglo general de la subestación para determinar el área en que se pondrá el sistema de tierra. Obtener el perfil de resistividad del suelo y con este dato se establece el tipo de suelo (dos capas u homogéneo) que requiere dicha red.

Por la norma NRF-011-CFE-2004 no se debe de considerar los químicos en el suelo para mejorar la resistividad, esto debe de considerarse como última opción

Paso 2: Se determina el calibre que se usará en la red de tierra calculando la corriente de falla $3I_0$, la cual debe de ser la máxima corriente de falla futura esperada que pueda conducir cualquier conductor, el tiempo t_c debe de ser el tiempo máximo en la que la red de tierra podrá disipar la falla incluyendo el tiempo de la protección de respaldo. Se debe de considerar la corriente de fase a tierra o de dos fases a tierra la que resulte más crítica, ya que como se dijo anteriormente debe de ser la máxima corriente.

Paso 3: En este paso se determina las tensiones tanto de toque como de paso que puede soportar un individuo con un peso aproximado de 50 kg para esto se toma en cuenta el tiempo máximo en disiparse la falla que normalmente este tiempo está dentro del rango de 0.1 s y 1.0s.

La corriente que no afecta al corazón I_B está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y se describe con la siguiente ecuación: $I_B = K / \sqrt{t}$ s.

Dónde:

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

$S_B = 0.0135$ es la constante empírica del impacto de energía tolerado cuando se aplica a un porcentaje de la población.

t_s = tiempo máximo de disipación de la falla.

Paso 4: En el diseño inicial se considera una rejilla para tierra la cual la formaremos con electrodos y conductores interconectados entre si y permitirá el acceso a los conductores de puesta a tierra de estructuras y carcasas de los equipos. La separación estimada de los conductores y electrodos para la rejilla de



tierra tienen como base la corriente I_G y el área de la subestación que se requiere proteger.

Por la norma NRF-011-CFE-2004 las subestaciones de 115 kv en el lado de alta tensión la rejilla de tierra deben de ser de 8m x 8m en toda el área del terreno y para las subestaciones de 230 kv y 400 kv en el lado de alta tensión la rejilla de tierra deben de ser de 10m x 10m en toda el área del terreno; estas medidas también aplican para la tierra de la cerca.

Paso 5: En este paso se realiza una estimación de la resistencia del sistema de tierra y que la norma NRF-011-CFE-2004 indica:

- Para subestaciones de potencia a nivel de transmisión y subtransmisión la resistencia del sistema de tierra debe de ser de 1Ω o menor.
- Para subestaciones de potencia de media tensión, el valor de la resistencia debe de ser de 1 a 4Ω .
- Para subestaciones de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe de ser como máximo de 5Ω .

Paso 6: Se determina la corriente máxima I_G en la red de tierra, para eso se utiliza la porción de la corriente de falla $3I_0$ que fluye por la red de tierra hacia la tierra remota. Sin embargo se debe de tener en cuenta un factor de decremento de la falla así como la peor localización y tipo de falla.

Paso 7: En este paso se analiza una elevación de potencial de tierra (GPR), mediante la siguiente ecuación: $GPR = I_G \times R_g$. Si el resultado de esta evaluación es un valor por debajo de la tensión tolerable por un humano (70 kg) ya no es necesario seguir con el análisis de dicha elevación; únicamente se requiere de conductores adicionales para aterrizar las carcasas de los equipos y estructuras metálicas.

Paso 8: Se calcula la tensión de paso y de malla con las siguientes formulas:

- $E_m = \rho K_m K_i I_G / L_m$ para tensión de malla
- $E_{paso} = \rho I_G K_s K_i / L_s$ para tensión de paso.

Paso 9: Si la tensión de malla calculada es menor que la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano el diseño debe de darse por concluido. En caso contrario se debe de analizar de nuevo el diseño hasta obtener esta condición.

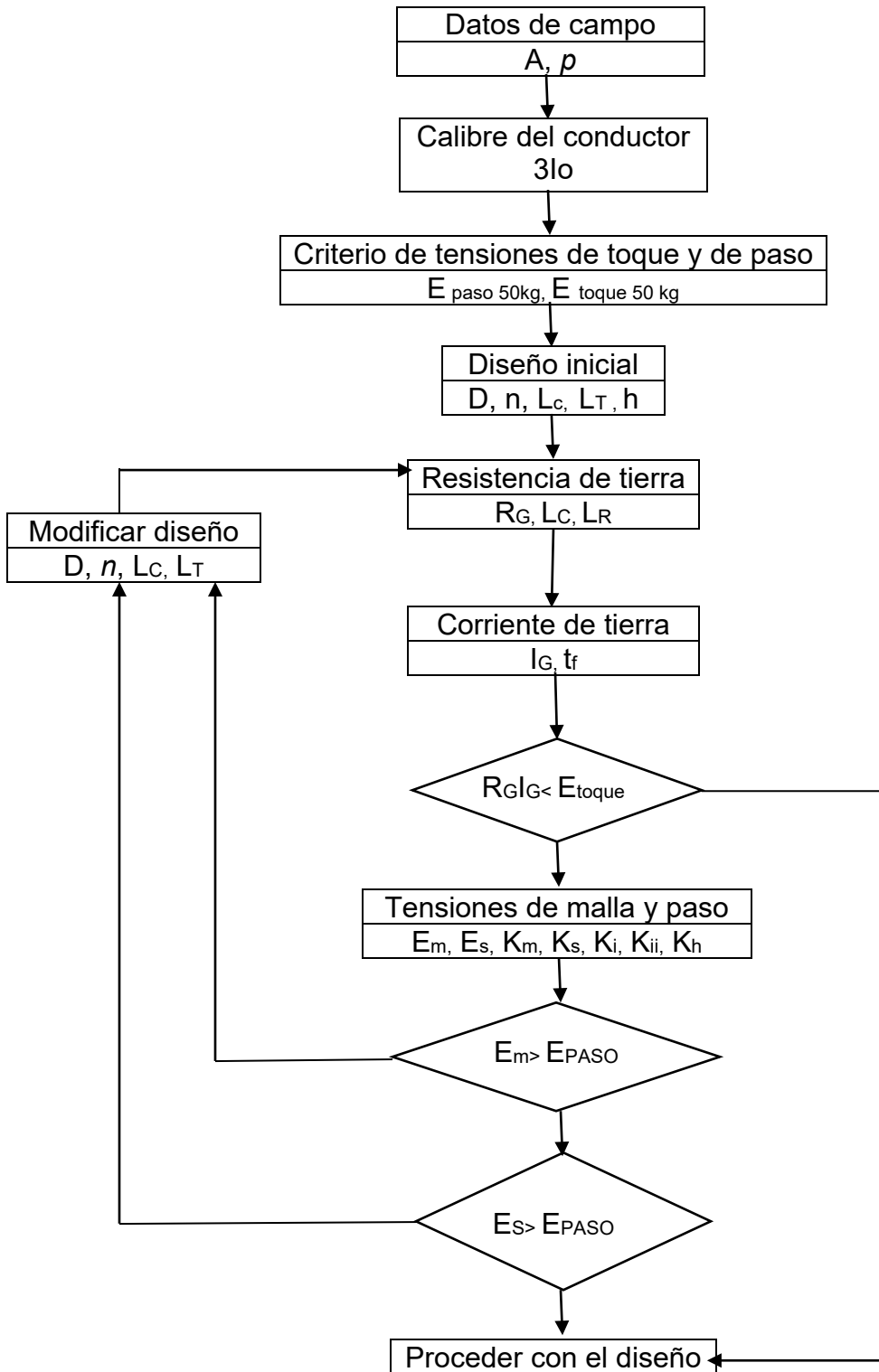
Paso 10: Si la tensión de paso es menor que la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano el diseño solo necesita de la puesta a tierra de carcasas y



estructuras metálicas de los equipos. En caso contrario se debe de analizar de nuevo el proyecto hasta obtener esta condición.

Paso 11: Si la condición de el paso 9 y 10 no se cumplen se deberá de revisar el diseño haciendo énfasis en incrementar el área para el sistema de tierra y espaciados adicionales más pequeños entre conductores y varillas para tierra.

Paso 12: Después de cumplir las condiciones de tensiones tanto de malla como de paso, se puede requerir de conductores adicionales para puesta a tierra de equipos y algunos electrodos verticales. Los conductores adicionales a la red de tierra se agregan cuando la red de tierra no incluye conductores cercanos al equipo que se necesite aterrizar. Los electrodos verticales adicionales pueden colocarse en la base de los apartarrayos, neutro de transformadores y otros equipos principales. El diseño final debe de revisarse con el propósito de eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y otros riesgos asociados.





2.- Marco teórico

2.1 Conectores para electrodos de puesta a tierra

La norma específica parte del grupo de materiales normalizados y, tiene como propósito fundamental determinar todas las características que deberán tener los herrajes y accesorios que se usen e instalen en el sistema de distribución de energía.

Esta norma incluye las exigencias y características que deben cumplir los conectores para los electrodos de puesta a tierra. El conector utilizado para sistemas de puesta a tierra es un elemento que tiene como función unir o conectar el conductor de puesta a tierra con los electrodos u otros conductores tal como lo establece la norma (RA7-017) para aterrizamiento de redes de distribución, instalaciones eléctricas, mallas de aterrizamiento de subestaciones y acometidas de servicio de energía en el sistema de distribución de energía.

En general el conector es un dispositivo metálico de conductancia eléctrica y resistencia mecánica adecuadas, usado para conectar los conductores y electrodos de aterrizamiento. Los conectores podrán estar enterrados o instalados arriba de la superficie. El conector podrá ser de los siguientes tipos: De compresión (en forma de "C" o "6"), de conexión elástica (cuerpo en "C" más cuña), de tipo grapa de uno o más tornillos, de tipo grapa de un tornillo con arandela de presión, conector de conexión elástica tipo cilindro.

Los conectores o grapas para electrodos de puesta a tierra, que estén enterrados, serán de cobre o de bronce con un mínimo de 80% de cobre o un material no ferroso, con una alta resistencia mecánica a la corrosión. No se aceptará conector de aluminio o aleación de aluminio cuando se instale bajo tierra. En las demás situaciones se aceptarán estos conectores.

El conector o grapa, para los sistemas de puesta a tierra, debe ser resistente a las descargas atmosféricas, fallas a tierra y corrientes a frecuencia industrial que se presentan en las redes de distribución, adicionalmente, ser resistente a la carga estática del suelo o concreto cuando esté enterrado. El conector debe garantizar que al estar enterrado en suelo o concreto, a una profundidad mínima de 0.30 metros, no sufrirá ningún tipo de deterioro o deformación.

El perno, cuando se utilice grapa, podrá ser de una cabeza que permita aplicar la torsión de apriete con una llave tipo copa o de cabeza hexagonal hueca. Deberá tener un torque de retención de tal manera que no se afloje cuando esté sometido a los efectos de una descarga atmosférica o del enterramiento. Para el caso en que se instale una grapa sencilla de un solo perno o tornillo sin arandela de presión, deberán utilizarse dos de estas grapas para la conexión del electrodo. *La*

torsión de apriete deberá ser de acuerdo con el tipo de perno, diámetros del electrodo y del alambre o cable a conectar, tal como lo indican las normas NTC, UL, CSA y ANSI/IEEE.

2.2 Cable de cobre desnudo.

Estos conductores están formados por alambres de cobre electrolítico pureza 99,9%, con cableado concéntrico de 7, 19, 39, y 61 hilos de acuerdo al calibre, en temple duro, semiduro o suave. Conductividad I.A.C.S. (International Annealed Copper Standard) a 20°C duro 96,16%, semiduro 96,66%, suave 100%. Resistividad volumétrica a 20°C en (Ohms-mm²/m). Duro 0,017 930, semiduro 0,017 837, suave 0,017 241. Alta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, elevada conductividad eléctrica y sección circular.

2.3 Electrodo o varillas para tierra.

En un sistema de tierra, el electrodo de tierra provee la conexión física para disipar la corriente a tierra. Existen 2 tipos básicos de electrodos: el natural, que está intrínsecamente dentro de la instalación que incluye todo el metal enterrado como tuberías de agua, la estructura del edificio (si está efectivamente conectada a tierra) y el metal de refuerzo de la cimentación.

Los electrodos fabricados son instalados específicamente para mejorar el desempeño de los sistemas de tierra que incluyen mallas de alambre, platos metálicos, conductor de cobre desnudo y varillas directamente enterradas en el terreno.

La varilla de tierra es el electrodo más utilizado. ERICO es el mayor fabricante a nivel mundial de varillas de tierra y ofrece una línea completa de varillas y accesorios para cumplir con cualquier necesidad del cliente. La varilla está constituida por un núcleo de acero y un recubrimiento de cobre aplicado mediante un proceso electrolítico, garantizando así una unión a nivel molecular que asegura un buen desempeño de la misma, durante su vida útil.

CATALOGO	DIAMETRO			LONGITUD (m)	ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO DE COBRE (mm)
	NORMAL		REAL		
	Pulgadas	mm	mm		
615800	5/8"	15.88	14.3	3.000	0.254
615950	5/8"	15.88	16.0	1.500	0.254
615900*	5/8"	15.88	16.0	3.000	0.254
693400	3/4"	19.05	19.0	3.000	0.254

* Esta varilla cumple con la especificación CFE-56100-16

NOTA: También producimos otros diámetros y longitudes sobre pedido



Investigación de la estructura del suelo.

Las investigaciones sobre resistividad del terreno de una subestación son esenciales para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. La resistividad de un material puro es una característica del mismo que depende del estado cristalino y temperatura y, las variaciones de su estructura cristalina debido a tratamientos térmicos, deformaciones mecánicas o impurezas, pueden afectar considerablemente su resistividad. El suelo está formado por diferentes componentes como el óxido de aluminio, sílice, etc., con capas muy heterogéneas, huecos, mantos acuíferos, por lo cual su estado se afecta debido a las condiciones climatológicas, las heladas, las lluvias y las constantes variaciones de temperatura. La resistividad varía de un lugar a otro y se ve mucho más afectado en las diversas épocas del año en función con los siguientes parámetros: la composición propia del terreno, la estratigrafía, la granulometría, la concentración de sales solubles, el estado higrométrico, la temperatura y la compactación. Las pruebas de las muestras de excavaciones, perforaciones y otras investigaciones geológicas, proporcionan información útil sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del suelo y, dan una idea sobre el rango de resistividad del terreno del sitio. La tabla siguiente muestra el rango de resistividades de suelos típicos.

Tipo de suelo	Rango de resistividad (Ω -m)	Tipo de suelo	Rango de resistividad (Ω -m)
Lama	5-100	Caliza fisurada	500-1000
Humus	10-150	Caliza compacta	1000-5000
Limo	20-100	Granito	1500-10000
Arcilla	80-330	Arena común	3000-9000
Tierra de jardín	140-480	Basalto	10000-20000

Características generales y selección del modelo de suelo.

Existe una gran variedad de suelo, ya que algunos son buenos conductores y otros son muy buenos aislantes, aunque la mayoría son buenos conductores y más, en épocas de lluvia. La resistividad del suelo está determinada básicamente por el porcentaje de humedad que presente, los componentes químicos que contenga y la temperatura de este, entre otros factores, y se mide en Ω -m.



Para un diseño adecuado de la red de tierra, se asume que los gradientes que se presentan no exceden las tensiones de toque y de paso críticas. Las corrientes en condiciones de falla que fluyen por los electrodos hacia el terreno circundante, puede afectar la resistividad del terreno alrededor de los electrodos de tierra, de esta forma sus propiedades térmicas y el contenido de humedad determinaran, si la corriente de una magnitud y duración causara que el terreno pierda humedad y pase a ser un terreno más resistivo, por lo que se considera como aceptable que no exceda la densidad de corriente en 200 A/m^2 en un segundo.

Hay que tomar en cuenta que el suelo también conduce electrolíticamente y, la resistividad del terreno se eleva considerablemente cuando se reduce el contenido de humedad a menos del 15 % del peso de dicho suelo. La cantidad de humedad en el suelo está dada por el tamaño y variabilidad de las partículas y compactación.

Modelo del suelo multicapas.

Se pueden encontrar condiciones de suelo altamente no uniforme, que requieren el uso de técnicas de modelamiento multicapas, cuando un modelo de suelo de dos capas no es factible. Un modelo multicapa puede incluir varias capas horizontales o varias capas verticales. Las técnicas para interpretar resistividades de suelo altamente no uniforme requieren el uso del método de los elementos finitos, considerando las características anisotrópicas del tensor de conductividad.

Modelo de suelo uniforme.

Cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se puede usar un valor promedio para la resistividad del suelo, como una primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del área bajo modelado, así:

$$\rho_{a \text{ prom}} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n}$$

Dónde: $\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an} \rightarrow$ Resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamientos siguiendo el método de Wenner.

$n \rightarrow$ Número total de medidas tomadas.

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente. En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30%.

Modelamiento asumiendo suelo uniforme.

Si se fuese a emplear un modelo de suelo uniforme, lo cual es bastante discutible en este caso, por la diferencia que existe entre el mayor valor de ρ_a y el menor valor de ρ_a , el resultado, aplicando la fórmula 20 sería:

$$\rho_{aprom} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \rho_{ai}}{n} = \frac{3171.88}{15} = 211.46 \Omega - m$$

Modelo de suelo de dos capas.

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión K , definido como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Dónde:

ρ_1 → Resistividad de la capa superior en Ω -m.

ρ_2 → Resistividad de la capa inferior en Ω -m.

En muchos casos, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema seguro de puesta a tierra. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de Sunde, como sigue:



- a) Dibujar el gráfico ρ_a vs. a .
- b) De la gráfica anterior se estiman ρ_1 y ρ_2 , extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad, si los datos de campo son insuficientes.
- c) Determinar ρ_2/ρ_1 y seleccionar una curva del gráfico de la Figura 4, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- d) Seleccionar el valor de ρ_a/ρ_1 sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada.
- e) Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- f) Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_a/ρ_1 por ρ_1 .
- g) Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs. a .
- h) Calcular la profundidad del nivel superior H usando la separación de prueba apropiada a .

Resistividad de la capa superior.

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo. Una capa superficial con un espesor (h_s) entre $0.15\text{m} \geq h_s \geq 0.1\text{m}$ de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla y, del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad del orden de $5000 \Omega\text{-m} > \rho_s > 2000 \Omega\text{-m}$. Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m , disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

Se introduce aquí el factor de disminución de la capa superficial (CS), que puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de CS; sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de CS, Este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico.

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

Dónde:

CS → Factor de disminución de la capa superficial.

ρ → Resistividad del terreno (Ω -m).

ρ_s → Resistividad de la capa superficial (Ω -m).

h_s → Espesor de la capa superficial.

La norma también define el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes como:

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

Medición de la resistividad.

Debido a la necesidad de encontrar una resistividad baja en el sitio, la subestación, es necesario primeramente determinar las características del suelo, lo cual permitirá definir los componentes de éste, así como los componentes adecuados para abatir la resistencia de la red de tierra de la subestación.

La resistividad del suelo está basada en el análisis estadístico, el cual permite solo una aproximación debido a que las características de una conexión a tierra, varía con las estaciones del año, por lo que es necesario para el diseño adecuado de la red de tierra, recopilar datos del campo en el terreno de la subestación, realizando mediciones en diversos lugares del suelo, considerando las posibles capas del subsuelo para definir un modelo homogéneo o un modelo estratificado, ya que las variaciones horizontales y verticales provocan que se distorsione la trayectoria de la corriente de falla a drenar.

Las mediciones deben tener datos sobre temperatura, contenido de humedad, tipo de terreno, profundidad y estación del año al realizar la medición, concentraciones de sales, así como la probable existencia de objetos conductores enterrados, por lo que es necesario en estos casos, realizar varias mediciones en espacios cortos del terreno. En las siguientes tablas se muestran los rangos de resistividad para varios tipos de suelo:

Tipo de tierra	Resistividad promedio ($\Omega\text{-m}$)
Tierra orgánica mojada	10
Tierra húmeda	1,000
Tierra seca	10,000
Roca	100,00

Naturaleza del suelo	Resistividad promedio
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Terreno húmedo o suelo orgánico	10 a 50
Terreno de cultivo o arcilloso	50 a 100
Tierra arenosa húmeda	100 a 200
Tierra arenosa seca	200 a 1,000
Tierra con guijarros y cementos	200 a 1,000
Roca cristalina	50 a 500
Arena y grava	50 a 1,000
Roca porosa	20 a 2,000
Suelo rocoso húmedo	2,000 a 3,000
Granito basalto, etc	1,000
Roca compacta	1,000
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Marga y arcillas compactadas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 300
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1,500 a 3,000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactadas	1,000 a 5,000
Calizas agrietadas	500 a 1,000



Pizarras	50 a 300
Roca de mica o cuarzo	500 a 5,000
Granito y gres procedentes de alteraciones	1,500 a 10,000
Roca ígnea	5,000 a 15,000

Las mediciones permitirán establecer la representación del suelo a través de un modelo homogéneo, por lo que se deben realizar en varios lugares dentro de la superficie o donde se proyecte instalar la subestación.

Para medir la resistividad del terreno es necesario hacer que circule una corriente a través de él, para lo cual se requieren insertar electrodos en el suelo que propicien tal circulación de corriente. El método generalmente utilizado es el de los cuatro electrodos desarrollado por el Alemán Frank Wenner.

Métodos de medición de resistividad del terreno.

Los estimativos basados en la clasificación del suelo ofrecen sólo una aproximación de la resistividad; por tanto, las pruebas reales son imperativas. Éstas deben hacerse en muchos lugares dentro del área de la subestación. Rara vez se encuentran sitios de la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda el área completa y a profundidades considerables. Típicamente existen varias capas y cada una tiene una resistividad diferente. Con frecuencia ocurren cambios laterales y, en comparación con los verticales esos cambios son más grandes. Las pruebas de resistividad del suelo deben hacerse para determinar si existen variaciones importantes de la resistividad con la profundidad.

El número de mediciones tomadas debe ser más grande donde las variaciones son mayores, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad. Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable usar un rango incrementado de espaciamientos de prueba para obtener un estimativo de la resistividad de capas más profundas.

- A. Método de Wenner o de los cuatro electrodos.
- B. Método de Schlumberger-palmer.
- C. Método de tres puntos.

Método de Wenner o de los cuatro puntos.

Este método se utiliza por lo general cuando se tiene un suelo homogéneo, el cual es de una sola capa y se pueden realizar mediciones de resistividad con diferentes separaciones de electrodos, obteniéndose un valor de resistividad constante, en cambio para un suelo heterogéneo las mediciones serán diferentes al cambiar la separación de los electrodos. Y éste es el mayormente utilizado para medir la resistividad promedio del terreno.



El método fue desarrollado por Frank Wenner y para realizar las mediciones se requiere de cuatro pequeñas varillas localizadas sobre una línea recta (figura 2.2.1), las cuales se entierran a una profundidad b y espaciadas a una misma distancia entre ellas a . Se hace circular una corriente de prueba de baja frecuencia entre los electrodos extremos (electrodos de corriente C_1, C_2) y se mide la caída de potencial con un voltímetro de alta impedancia entre los dos electrodos interiores (electrodos de tensión P_1, P_2). Por tanto la relación entre la tensión y la corriente determina la lectura de la resistencia R , y con la siguiente ecuación permite calcular la resistividad del terreno.

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

Dónde:

ρ = resistividad del terreno ($\Omega - m$)

R = resistencia medida del terreno (Ω)

a = distancia entre electrodos o varillas (m)

b = profundidad de los electrodos (m)

Esta expresión se puede reducir a lo siguiente:

$P = 4\pi a R$ si $b > a$, es decir, cuando la profundidad de penetración es mucho mayor que la separación entre electrodos.

$P = 2\pi a R$ si $b < a$, es decir, cuando la profundidad de penetración es mucho menor que la separación entre electrodos.

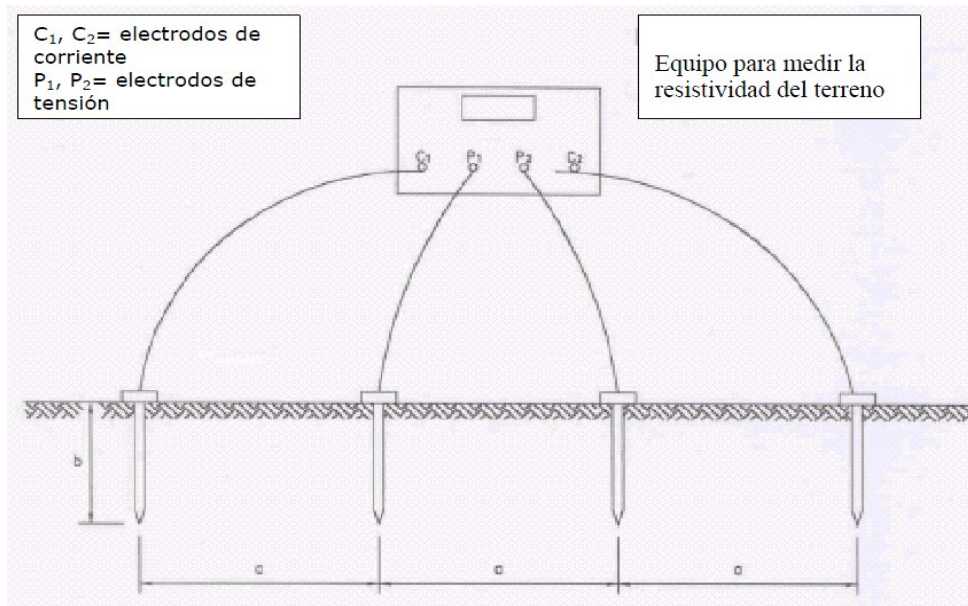
Las mediciones obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento, lo cual permite determinar, en su caso, la existencia de diversas capas del terreno.

Las mediciones deben realizarse perfectamente en temporada de sequía, evitando realizarse en días lluvioso o cuando este lloviendo.

En caso de conocer el área para la subestación las mediciones por el método Wenner debe hacerse en dirección de las diagonales que forman las cuatro esquinas del terreno iniciando del centro hacia fuera, se debe iniciar con una separación " a " = 3 o 5 m. Dependiendo de la profundidad requerida de los electrodos para dar firmeza a su colocación, se deben dar incrementos de " a " de 2

a 3 metros hasta llegar a una separación de $\frac{1}{3}$ de L, que es la longitud mayor del rectángulo formado por las dimensiones del terreno.

Las dimensiones “a” recomendadas entre los electrodos son: 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0, 9.6, y 11.2 metros.



a= distancia entre electrodos (varillas)
b= profundidad de los electrodos

Método de Schlumberger- Palmer.

Este método es prácticamente el mismo que el anterior, pero se considera el espaciamiento de los electrodos interiores de tensión d mayor al de los de corriente C esta disposición (figura 2.2.2) permite medir la resistividad del terreno con espaciamientos entre varillas mayores que el espaciamiento utilizado en el método Wenner, el cual tiene la desventaja del decremento rápido en la magnitud de tensión medida entre los electrodos interiores, cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes.

En la figura 2.2.2 se aprecia que los electrodos de tensión se localizan lo más cercano a los electrodos de corriente, lo cual incrementa la tensión medida.

Considerando que la profundidad de los electrodos V , es pequeña comparada con la separación entre ellos, la resistividad se determina con la ecuación siguiente.

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

Dónde:

ρ_s = resistividad aparente del suelo ($\Omega - m$)

c = distancia entre electrodos de corriente y tensión (m)

d = distancia entre electrodos de tensión (m)

R = resistencia medida del terreno (Ω)

Las variaciones de las resistividades medidas debidas a irregularidades en la superficie, se reduce considerablemente y se obtiene mayor precisión en la longitud de mediciones grandes.

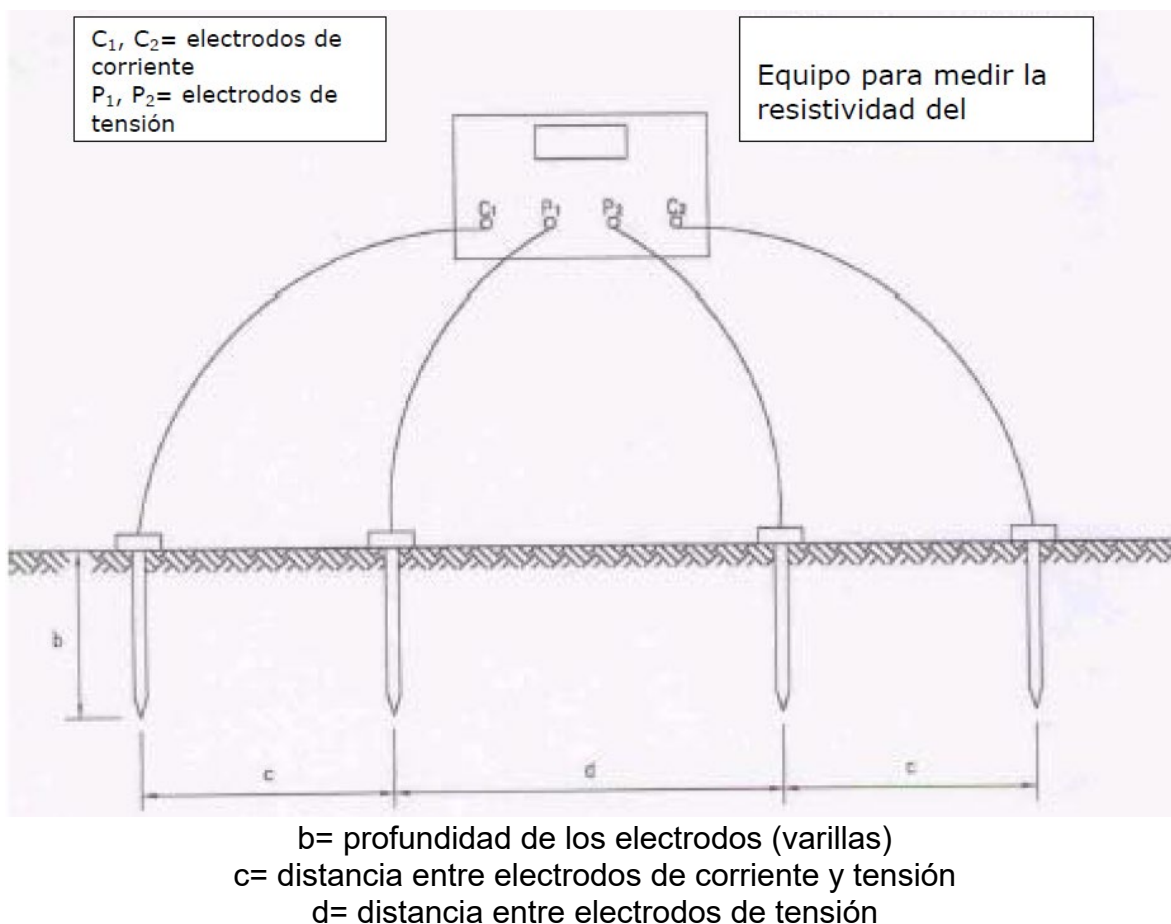


Figura 2.2.2 medición de la resistividad del terreno por el método de Schlumberger- Palmer

Método de los tres puntos.

Este método consiste en hacer circular corriente entre dos electrodos fijos, uno auxiliar de corriente (C_2) y otro de prueba (C_1), y se mide la caída de tensión. Este método permite variar la profundidad del electrodo de prueba, considerando que éste forma parte integral de la red de tierra de la subestación. Se tiene un tercer electrodo (varilla auxiliar de tensión P_2) el cual se ubica entre el de corriente y el de prueba y se desplaza para realizar diversas lecturas. Las varillas de referencia, se deben clavar a poca profundidad sobre una línea recta a partir del electrodo de prueba (perímetro del área de la red de tierra), de forma radial o perpendicular. Cuando la varilla auxiliar de tensión P_2 se encuentra en un área con variaciones con resistencia efectiva, los valores, al desplazar esta varilla, varían notablemente debido a que se traslapan los diámetros de acoplamiento.

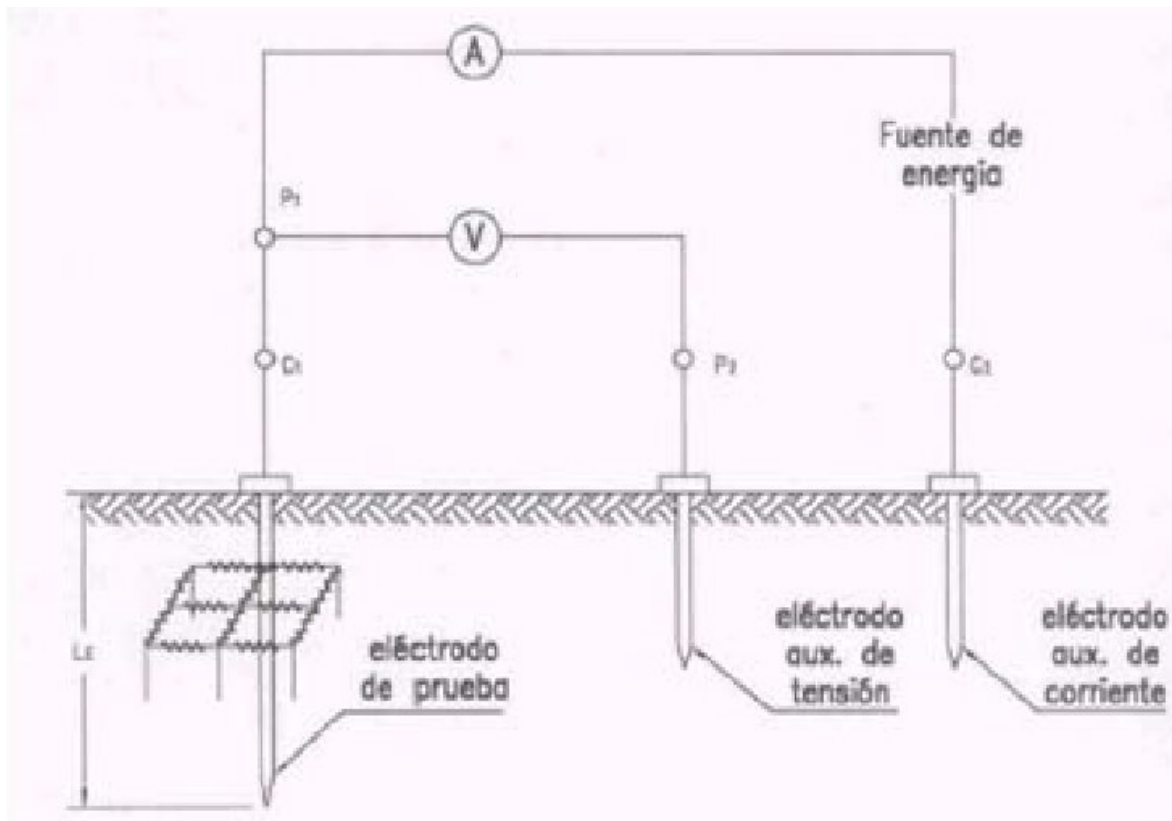


Figura 2.0. Método de caída de tensión para medir la resistividad del terreno.

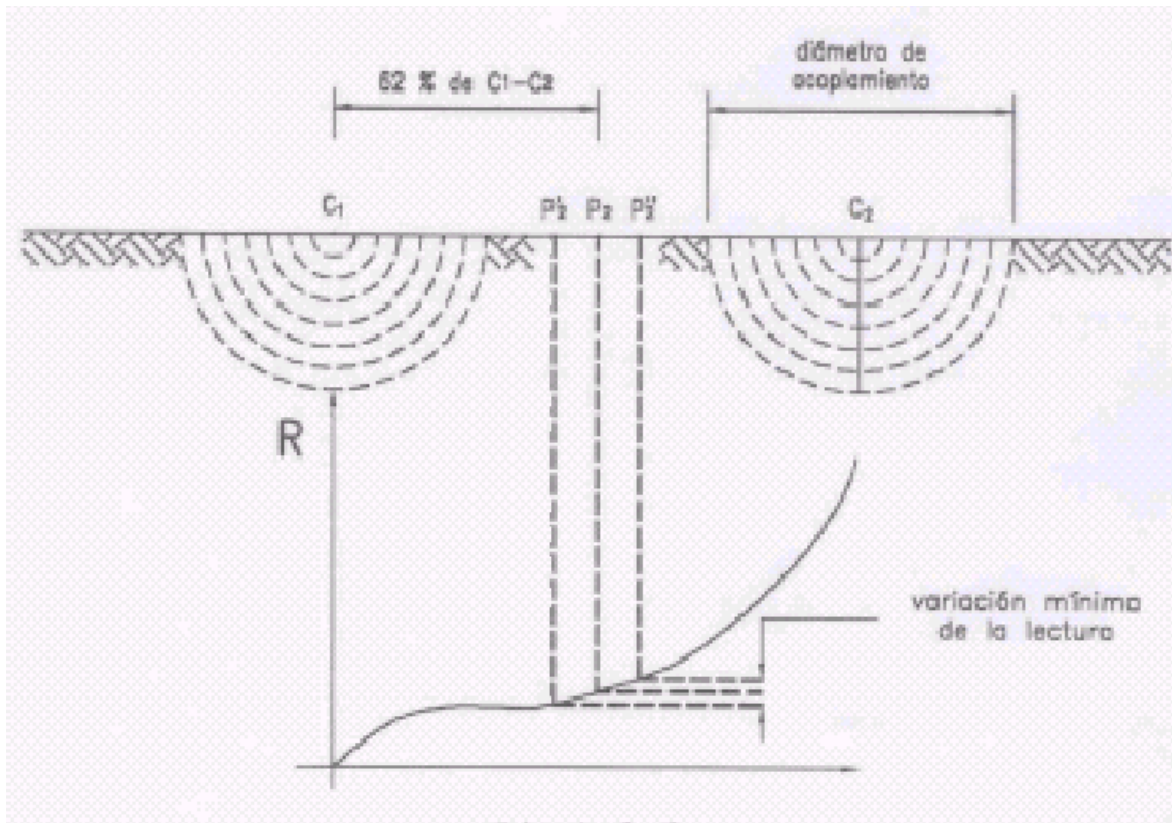


Figura 2.1. Método de caída de tensión para medir la resistividad del suelo.

Considerando un suelo uniforme y, para minimizar la interferencia entre electrodos, es conveniente localizar la varilla de tensión a 62% de la distancia de las varillas de corriente y la de prueba. Este procedimiento es más preciso, pero está limitado debido a que solo se realiza una medición, por lo que es muy útil para suelo uniforme. La resistividad del terreno está determinada por la siguiente fórmula:

$$\rho_c = \frac{2\pi L_E R}{\ln\left(\frac{4L_E}{r_E}\right) - 1}$$

Dónde:

ρ_c = resistividad aparente del suelo (Ω -m)

L_E = longitud del electrodo bajo prueba (m)

R = resistencia medida del terreno (Ω -m)

r_E = radio de la sección transversal del electrodo bajo prueba (m)

Este método es de gran ayuda para determinar las variaciones de la resistividad del terreno con la profundidad, debido a que se pueden graficar las longitudes de la varilla de prueba contra las resistividades medidas.

Resistividad de la capa superior.

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo. Una capa superficial con un espesor (h_s) entre $0.15\text{m} \geq h_s \geq 0.1\text{m}$ de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla y, del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad del orden de $5000 \Omega\text{-m} > \rho_s > 2000 \Omega\text{-m}$. Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m , disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

Se introduce aquí el factor de disminución de la capa superficial (CS), que puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de CS; sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de CS, Este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico.

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

Dónde:

- CS → Factor de disminución de la capa superficial.
- ρ → Resistividad del terreno ($\Omega\text{-m}$).
- ρ_s → Resistividad de la capa superficial ($\Omega\text{-m}$).
- h_s → Espesor de la capa superficial.

La norma también define el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes como:

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

Modelo del suelo.

Los cálculos preliminares para el diseño del sistema de tierra en una subestación, están determinados por el modelo del suelo seleccionado, el cual permite definir la resistividad aparente que identifica el comportamiento del terreno. La determinación de la resistividad del terreno debe obtenerse partiendo de mediciones en el área de la subestación donde se instalara la red de tierra y así obtener la curva de resistividad resultante.

El suelo posee varias capas con diferentes composiciones y estructuras y, su resistividad varía lateralmente y con la profundidad, dependiendo de su estratificación. Existen tres modelos comúnmente usados para determinar la resistencia aparente, los cuales son una aproximación de las condiciones propias del terreno, dos modelos de suelo uniforme y el modelo de dos capas que se desarrollara por métodos computacionales o gráficos.

El modelo de suelo uniforme debe usarse cuando las variaciones entre capas son moderadas por lo cual la resistividad promedio del suelo puede calcularse con una primera aproximación con la expresión siguiente:

$$\rho_p = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 \dots \rho_n}{n}$$

Dónde:

ρ_p = resistividad aparente promedio ($\Omega - m$)

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ = resistividad aparente medida por el método Wenner empleando diversos espaciamientos y/o profundidades entre electrodos de prueba.

n = número total de mediciones.



También la resistividad promedio, para el modelo de suelo uniforme, puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$\rho_p = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2}$$

Dónde:

ρ_p = resistividad aparente promedio ($\Omega - m$)

ρ_{\max} = resistividad aparente máxima medida ($\Omega - m$)

ρ_{\min} = resistividad aparente mínima medida ($\Omega - m$)

Esta última expresión no se debe de utilizar en sistemas de tierras que carecen de electrodos de puesta a tierra y, además estos electrodos deben tener al menos la profundidad para medir la resistividad que corresponde al valor ρ_p calculado por la ecuación anterior.

Por otra parte, la representación del suelo de dos capas, sobre todo cuando la resistividad varía significativamente, es una aproximación en diversos casos prácticos desarrollada por GFTAGG y que hasta la fecha es útil para diferentes estructuras de suelo.

Diversos estudios han determinado que es posible obtener un modelo de la constitución del suelo mediante una representación de un terreno de dos capas, con resistividades diferentes en la capa superior e inferior ρ_1 y ρ_2 respectivamente, es decir que la primera capa de suelo a cierta profundidad tiene un determinado valor uniforme y la segunda capa con una resistividad uniforme pero diferente, se considera con una profundidad infinita.

Los cambios abruptos en los límites de cada capa de suelo, están determinados por el factor de reflexión siguiente:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$



Dónde:

$K =$ factor de reflexión

$\rho_1 =$ resistividad de la capa superficial (primera capa) ($\Omega - m$)

$\rho_2 =$ resistividad de la capa inferior (segunda capa) ($\Omega - m$)

Existen varias técnicas para determinar la resistividad aparente utilizando el modelo de dos capas, obtenidos con pruebas en sitio. Se puede determinar este modelo en forma aproximada, analizando la curva que resulta de graficar las mediciones de la resistividad aparente contra la profundidad del electrodo de prueba o también la resistividad aparente contra el espacio en electrodos de prueba a , empleando el método Wenner de medición, pero la tipificación del modelo de dos capas para un terreno en particular, requiere del uso de programas de computadoras. Así mismo, se cuenta con el método gráfico aproximado para el modelo de dos capas, desarrollado por Sunde, que permite calcular la profundidad h_{cl} de la capa superficial (primer capa) del terreno utilizando la apropiada separación entre los electrodos de prueba a , al realizar las mediciones por el método Wenner. El procedimiento consiste en lo siguiente:

1. Graficar la resistividad aparente p_w sobre el eje “y” contra la separación de electrodos de prueba a en el eje “x”.
2. Estimar de la gráfica anterior, un valor para p_1 con separación \underline{a} pequeña y un valor de p_2 con la separación \underline{a} larga. Extender los valores a ambos extremos si, en caso, la gráfica no es suficiente.
3. Calcular la relación p_2/p_1 y en la gráfica de Sunde (figura 2.5), interpolar para dibujar una nueva curva considerando su inicio con el valor de la relación anterior hasta el eje vertical donde $(p_w/p)=1$
4. Seleccionar el valor de p_w/p_1 sobre el eje vertical “y” en la curva de Sunde, considerando el punto aproximadamente a la mitad de la pendiente de la curva, es decir menor que la relación p_2/p_1 calculada en el tercer paso.
5. Leer sobre la gráfica anterior en el eje x, el valor correspondiente de a/h_{cl} .
6. Calcular el valor de p_w despejando de la sección del cuarto paso anterior y sustituir el valor de p_1 seleccionado en el segundo paso.
7. Leer la gráfica del primer paso, el correspondiente espaciamientos a de los electrodos de prueba para la resistividad p_w calculada en el sexto paso.
8. Calcular la profundidad de la capa superficial h_{cl} despejada del valor encontrado en el quinto paso y sustituir el valor de a leído en el séptimo paso.

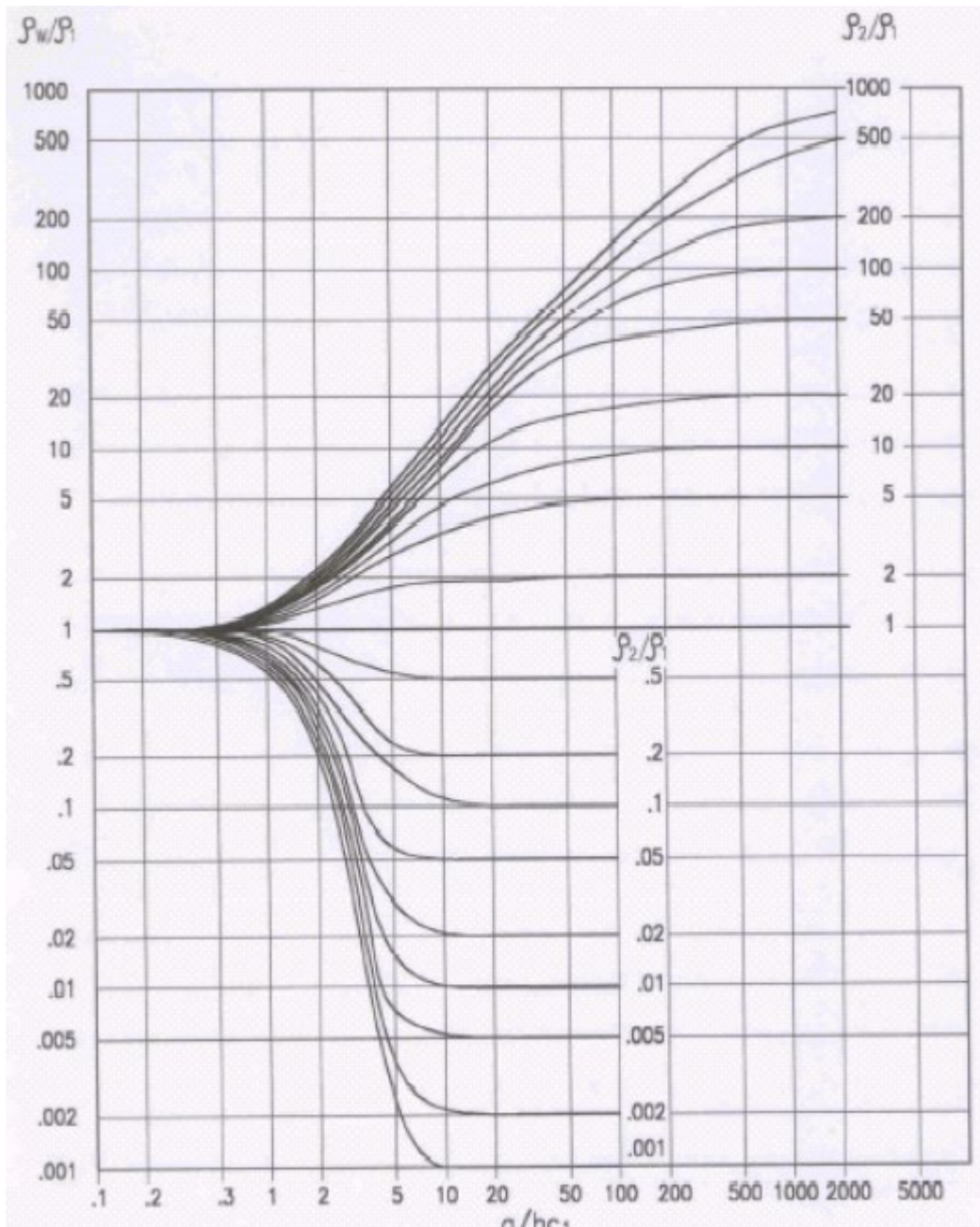


Figura 2.5 método de Sunde.

El definir la profundidad h_{cl} de la capa superficial de terreno, permite evaluar el grado de estratificación del terreno y así determinar la aplicación, en su caso, de las ecuaciones para calcular la resistividad considerando el suelo uniforme.

Como se mencionó, el factor de reflexión k para el modelo de dos capas, determina el compartimiento de la red de tierra y asumiendo que la red de tierra se



encuentra se encuentra en la primera capa del terreno, cuando se tiene el factor k negativo ($p_1 > p_2$), es decir, que la primer capa del suelo tiene mayor resistencia que la capa inferior, la densidad de corriente es más uniforme hacia el interior de los conductores que conforman la red de tierra, las tensiones de paso y de toque son más altas que para un suelo uniforme con resistividad p_1 y se abaten considerablemente al agregar electrodos de tierra adicionales, por otra parte, la resistencia de la red de tierra será más alta que la correspondiente para suelo uniforme con una resistividad p_1 . Para valores medios de profundidad h_{cl} de la capa superficial, prácticamente toda la corriente se carga en esta primer capa del terreno. Cuando se tienen profundidades pequeñas de la red de tierra, para reducir los gradientes de tensión, es conveniente aumentar el mallado de la red de tierra y de esta manera se abate el efecto de la profundidad de la capa superficial y del factor k .

Cuando el factor de reflexión k es positiva ($p_1 < p_2$), las tensiones de paso y toque son generalmente más bajas que para el suelo uniforme con resistividad p_1 , la densidad de la corriente en los electrodos de tierra en la capa superior, es mayor que las propias mallas conductores y la resistencia de la red de tierra será más baja que la resistencia para un suelo uniforme con resistividad p_1 .

En general la resistencia del sistema de red de tierra, depende de la profundidad de la capa superficial y del coeficiente de reflexión (resistividad del terreno), pero se abate siempre que las capas del suelo tengan mayor conductividad. En la tabla 2.5.1 siguiente se comparan los parámetros calculados empleando el modelo de suelo uniforme y el modelo de dos capas para dos tipos de suelo con factor k negativo y positivo.

Por otra parte, en la tabla 2.5.2 se describen los resultados obtenidos, empleando el modelo de dos capas, variando la separación de los electrodos de prueba a , al medir la resistividad aparente del terreno con el método de Wenner. Se nota en la tabla 2.5.2 la notoria variación en el valor de la resistividad aparente, al incrementar la separación entre los electrodos de prueba; esto se contribuye fundamentalmente a la variación exponencial de la resistividad en función de la profundidad de la capa superficial, la cual determina el comportamiento de los electrodos de tierra para un suelo uniforme o para el modelo de dos capas. Cuando la profundidad de la capa superficial es apreciablemente mayor que la longitud de los propios electrodos de tierra, el comportamiento de estos, es muy similar al que tendrían cuando se entierran en el suelo uniforme con resistividad p_1 .

Tabla 2.5.1 Parámetros calculados para los modelos de suelo uniforme y de dos capas

TIPO DE SUELO	MODELO DE DOS CAPAS DE SUELO					MODELO DE SUELO UNIFORME			
	P_1, ρ_2 (Ω -m)	h_{cl} (m)	R_g (Ω)	E_m (V)	E_s (V)	ρ_{p2} (Ω -m)	R_g (Ω)	E_m (V)	E_s (V)
A(+) K	100,300	6.1	1.28	126	85	158	0.89	151	86
B(-) K	300,100	6.1	0.72	187	92	192	1.09	185	106

Tabla 2.5.2 parámetros calculados con el modelo de dos capas para los tipos a y b de suelo en la tabla 2.5.1, usando el método de Wenner de medición.

Separación de electrodos de prueba.		Tipo A de suelo.		Tipo B de suelo.	
a		$(+) k$		$(-) k$	
(pies)	(m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)
1	0.305	29.73	56.94	89.13	170.74
3	0.915	15.33	88.07	45.85	263.46
5	1.524	9.97	95.48	29.55	283.06
15	4.573	3.85	110.71	9.39	269.67
20	6.098	3.15	120.76	6.46	247.57
30	9.146	2.49	143.1	3.52	202.12
50	15.244	1.9	181.7	1.5	144.05

Teoría de las componentes simétricas

El Dr. L. Fortescue dio a conocer en 1918 su teoría sobre las componentes simétricas, a las que llamo coordenadas simétricas.

“Un sistema balanceado de n fases puede estudiarse mediante n sistemas balanceados, cada uno, con una cierta secuencia de fases, de tal forma que cualquier variable (V o I) del sistema original, puede obtenerse mediante la suma de sus componentes de secuencia”.

Este método se aplica cuando las impedancias de las componentes del sistema son balanceados (impedancia por fase y mutuas son iguales). La suma de 3 secuencias (0, 1, 2) balanceadas es igual a una de las fases (A, B o C). Aplicando el teorema de las componentes simétricas para tensiones, los grupos de componentes son:

- **Componentes de secuencia positiva:** grupo formado por tres fasores balanceados (igual magnitud y desfasados 120°) secuencia “abc” con subíndice “1”.
- **Componentes de secuencia negativa:** grupo de tres fasores balanceados, secuencia opuesta “acb” con subíndice “2”.
- **Componentes de secuencia cero:** grupo integrado por tres fasores de igual magnitud, sin desfaseamiento, es decir, sin secuencia o simultáneos, con subíndice “0”.

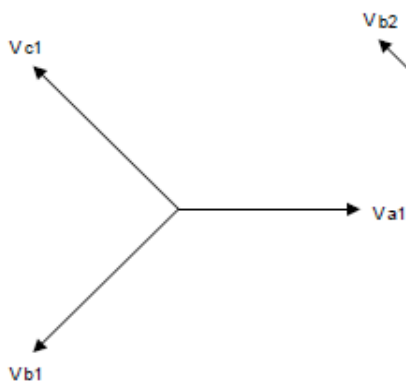
De acuerdo con lo siguiente se tiene:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

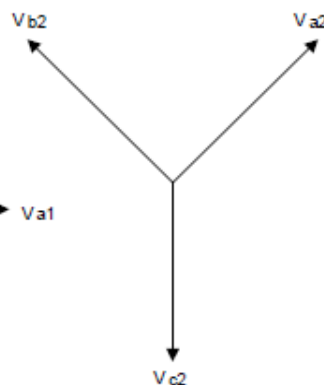
$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

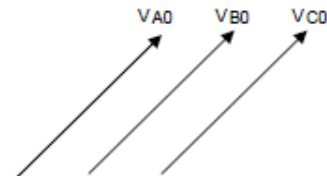
Componentes de secuencia positiva



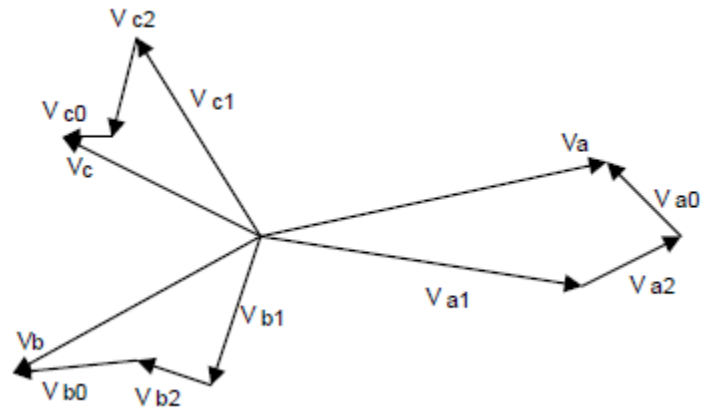
Componentes de secuencia negativa



Componentes de secuencia cero

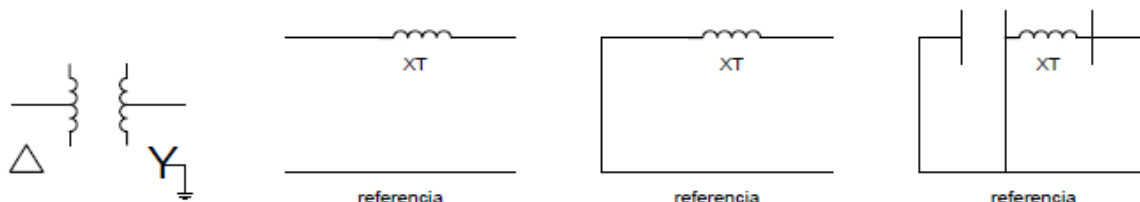


Fasores desbalanceados obtenidos a partir de sus componentes simétricas.



3.3 diagramas de secuencia equivalentes de los equipos de sistemas eléctricos de potencia (estudio de corto circuito).

TRANSFORMADORES



SIMBOLO (EQUIPO)

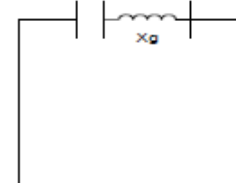
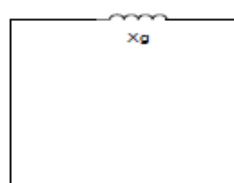
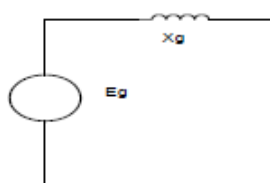
generadores

Y

SEC(+),SEC(1)

SEC(-),SEC(2)

SEC(0)

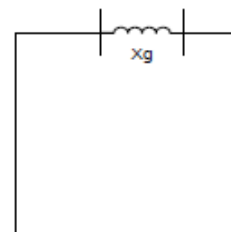
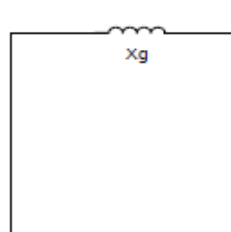
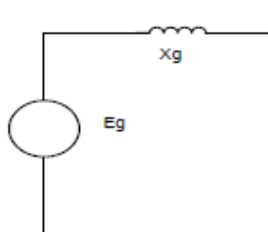


referencia

referencia

referencia

Y

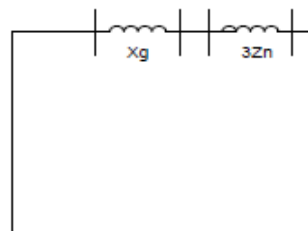
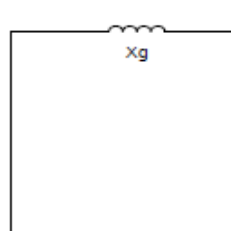
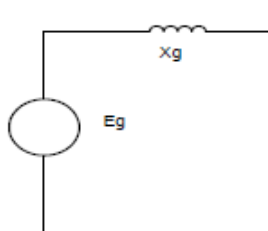


referencia

referencia

referencia

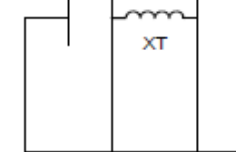
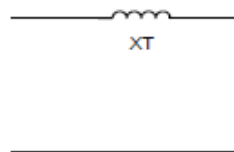
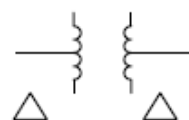
Y



referencia

referencia

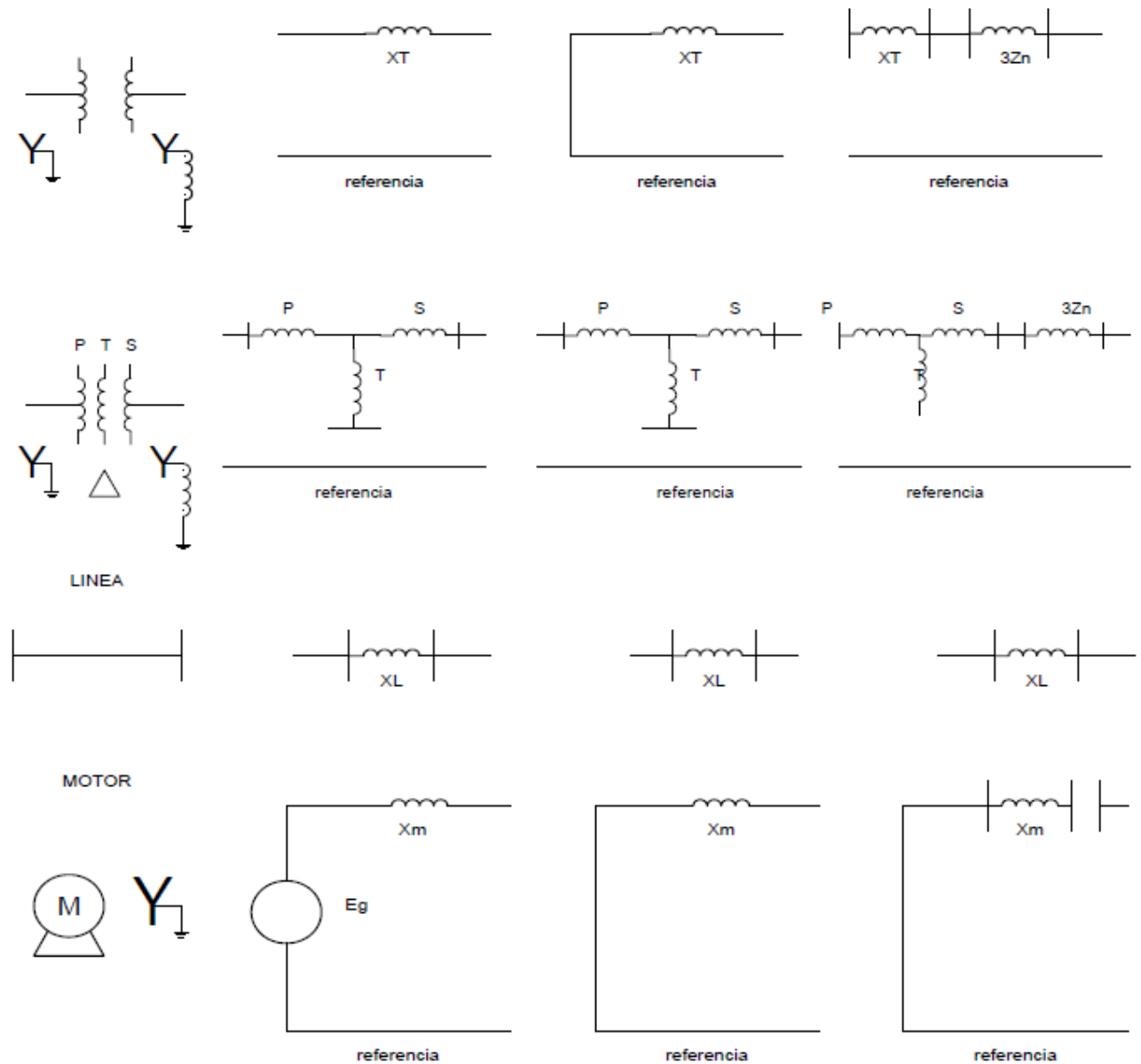
referencia



referencia

referencia

referencia



Determinación del corto circuito por el método de Ybus y Zbus.

$$Y_{bus} \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix}$$

Dónde:

$Y_{11}=Y_{22}=Y_{33}=Y_n$ Admitancias apropiadas

$Y_{12}=Y_{21}$; $Y_{13}=Y_{31}$; $Y_{23}=Y_{32}$ Admitancias mutuas

$Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}, \dots Z_m \rightarrow$ Son las impedancias de Thevenin equivalentes en cada nodo de secuencia (+), (-) y (0) respectivamente.

Aplicando ley de ohm tenemos:

$$V = ZI \text{ despejando } I$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{Y^{-1}} \text{ Dónde}$$

$$Y = \frac{1}{Z} \text{ entonces } I = \frac{V}{\frac{1}{Z}}$$

$Y =$ Admitancias.

Con lo cual podemos obtener las corrientes de corto circuito del sistema:

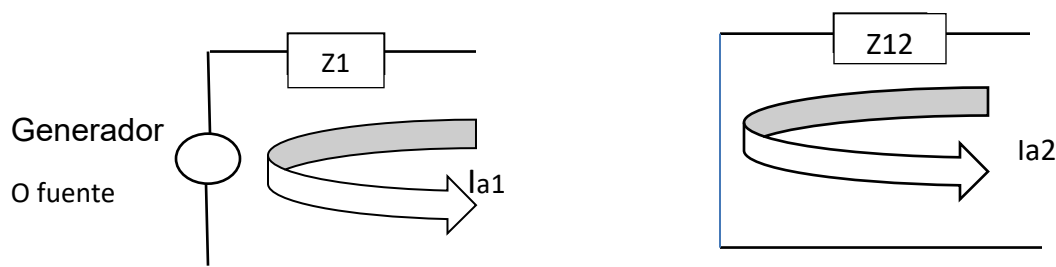
$$I_{cc_{1\phi}} = \frac{3E}{X^{(+)} + X^{(-)} + X^{(0)}} = \frac{3E}{2X^{(+)} + X^{(0)}}$$

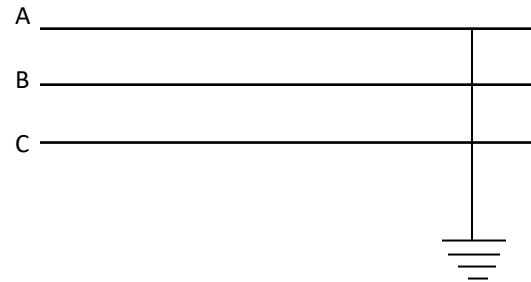
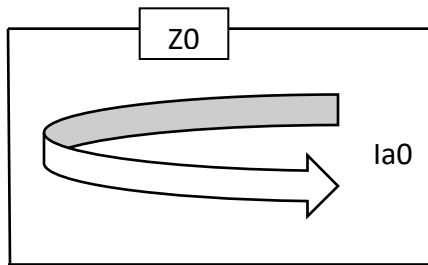
$X =$ reactancias de secuencia.

$$I_{cc_{3\phi}} = \frac{E}{x^{(+)}}$$

Fallas de fase a tierra (monofásica).

Para el diseño de una red de tierra, se emplea corriente monofásica, ya que es la que circula a tierra, aunque la trifásica sea peor, no se utiliza pues es una falla balanceada y la corriente a tierra es cero.





$$V_a = 0$$

$$I_b + I_c = 0$$

Aplicando componentes simétricas, para corrientes:

$$\begin{pmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \Rightarrow \left. \begin{aligned} I_{A0} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_a \\ I_{B1} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_a \\ I_{C2} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_a \end{aligned} \right\} I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$$

$$\frac{1}{3} I_{a0} = \frac{1}{3} I_{a1} = \frac{1}{3} I_{a2} = \frac{Ea}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

$$I_a = \frac{3Ea}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

Para tensiones:

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0}$$

$$V_{a1} = Ea - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2}$$

Entonces la corriente de corto circuito monofásica se determina empleando la siguiente ecuación:

$$I_{cc1\phi} = \frac{3E}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

Ya que las impedancias de las secuencias (+) es igual al de las secuencias (-) se obtiene la siguiente:

$$I_{cc1\phi} = \frac{3E}{Z_0 + 2Z_1}$$

Corriente de falla asimétrica eficaz.

En los estudios de corto circuito, los valores que se obtienen son las magnitudes de la corriente asimétrica eficaz, pero en el diseño de un sistema de tierra, se debe considerar la corriente asimétrica, por lo que se requiere tomar en cuenta un factor de decremento para incluirse en el valor de la corriente de falla obtenido, o sea el efecto de desplazamiento de la componente de corriente directa.

En general, la corriente de falla asimétrica incluye las componentes de corriente alterna subtransitoria, transitoria y en estado estable y la componente de corriente directa de desplazamiento. De la corriente asimétrica de falla, como una función de tiempo, se tiene que la constante de tiempo de la componente de C.D. es:

$$T_a = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} \quad \text{Dónde: } \omega = 2\pi f$$

T_a = constante de tiempo de la componente de C.D. de desplazamiento (s).

L = inductancia que determina a la reactancia X equivalente en el punto de la falla, a la frecuencia del sistema (henrys)

f = frecuencia del sistema

ω = frecuencia angular (radianes)

Como un corto circuito ocurre de forma aleatoria con respecto a la onda de tensión y como el contacto puede existir en el instante en que se inicia la falla, para

obtener la condición más severa, es necesario considerar, en el diseño de red de tierra, que la máxima magnitud de la componente de corriente directa está presente en el momento de ocurrir el contacto accidental y que la componente de corriente alterna no decrece con el tiempo, permaneciendo en su valor inicial.

Como el umbral de fibrilación está basado en una corriente senoidal simétrica de amplitud constante, es necesario determinar el valor eficaz (rms) equivalente de la onda de corriente simétrica de corto circuito para el corto circuito máximo, para el tiempo máximo de liberación de la falla. El valor eficaz de la onda de corriente asimétrica en el intervalo de tiempo de duración de la falla puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$I_F = D_f I_f$$

El factor de decremento es función de la resistencia, reactancia del sistema y del tiempo de liberación de la falla y está definido por la siguiente expresión:

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

Dónde:

D_f = factor de decremento

t_f = tiempo de liberación de la falla.

T_a = constante de tiempo definida por la relación de la inductancia (L) entre la resistencia (R) a la frecuencia (f) del sistema (60Hz).

El factor de decremento que se obtiene de la ecuación anterior es para un tiempo de duración de la falla y para una relación X/R específicos en donde:

$$X = X_1 + X_2 + X_0$$

$$R = R_1 + R_2 + R_0$$

La X_1 y la R_1 son las componentes de la impedancia subtransitoria equivalente en el punto de localización de la falla.

En la tabla 3.1 se indican los valores típicos de factores de decremento para diferentes tiempos de liberación de la falla y relaciones X/R.

Máxima corriente de la red de tierra.

La máxima corriente de la falla que puede circular entre una red del sistema de tierra y el terreno que lo rodea, queda determinada por la corriente de falla asimétrica eficaz calculada tomando en cuenta los cambios futuros del sistema de potencia, es decir:

$$I_G = I_F$$

Dónde:

I_G = corriente de la red de tierra (A)

I_F = corriente de falla asimétrica eficaz (A)

Tabla 3.1 valores típicos del factor de decremento D_f

Duración de la 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	1.628	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.1	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.2	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.3	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.4	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.5	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Corriente tolerable por el cuerpo humano.

Los efectos de la corriente eléctrica que puede circular a través de las partes vitales de un cuerpo humano dependen de la frecuencia, magnitud y duración de la corriente. La secuela más peligrosa por dicha exposición es una condición que presenta el corazón conocida como *fibrilación ventricular*.

Los humanos somos muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica con frecuencia de los sistemas de potencia (50 o 60 Hz), magnitudes de 0.1 A pueden ser mortales. El cuerpo humano puede soportar una magnitud de corriente ligeramente mayor con corriente directa. Entre las frecuencias de 3,000-10,000 Hz, corrientes aún mayores pueden ser tolerables. En algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar muy altas corrientes debidas a descargas

atmosféricas. Los efectos fisiológicos más comunes debidos a la magnitud de la corriente cuando circulaba por el cuerpo humano son:

- a) Umbral de percepción: la magnitud de 1 mA es la corriente con la cual una persona empieza a sentir una sensación de cosquilleo en las manos o en las puntas de los dedos
- b) Corriente de soltar: las corrientes entre 1 mA a 6 mA a pesar de que son dolorosas no atrofian la habilidad de la persona que sostiene al objeto energizado para controlar sus músculos y soltarlo. Para mujeres la corriente de soltar promedio es de 10.5 mA y para hombres de 16 mA y como valores umbrales de 6 mA y 9 mA respectivamente.
- c) Contracción muscular: en el rango de magnitud de 9 a 25 mA, las corrientes pueden ser intolerables y pueden hacer difícil o imposible soltar el objetivo sujetando con la mano. Para corrientes ligeramente mayores la contracción muscular puede dificultar la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente es interrumpida, aunque la contracción sea muy severa y se tenga un paro respiratorio por minutos, a menudo las personas responden a la resucitación.
- d) Fibrilación ventricular: es hasta magnitudes de corrientes de dentro del rango de 60 a 100 mA donde se presenta la acción no coordinada de los ventrículos del corazón resultando el paro de la circulación de la sangre y del corazón o también la inhibición de la respiración puede ocurrir causando daños o la muerte. La magnitud de corriente que puede circular por el cuerpo de una persona se debe mantener por debajo del umbral de fibrilación en el diseño del sistema de tierra de una subestación, para evitar el daño o muerte de la persona.

La magnitud de corriente de no fibrilación con un rango de duración de 0.03 a 3 segundos, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo humano y está determinada por la siguiente ecuación:

$$S_B = I_V^2 t_f$$

Dónde:

I_B = magnitud eficaz (rms) de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_f = duración de exposición de la corriente (s)

S_B = constante obtenida empíricamente, relacionada con la energía de choque eléctricos soportada por un porcentaje determinado de personas

El tiempo de duración de la corriente a frecuencia de 60 Hz, que la mayoría de la gente puede soportar sin fibrilación ventricular, está relacionado con la magnitud de la corriente de acuerdo a la ecuación anterior, obteniéndose:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_f}}$$

Dónde:

$$K = \sqrt{S_B}$$

La constante S_B que está relacionada con la energía de choque que puede soportar las personas con un peso aproximado de 50 kg, ya que tiene un valor de:

$$S_B = 0.0135$$

Con lo que la corriente tolerable por una persona de 50 kg es:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}$$

Para una persona con un peso de 70 kg, se tiene una constante de:

$$S_B = 0.0246$$

La corriente tolerable es:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

Con la interpretación de la ecuación $S_B = I_V^2 t_f$ el tiempo de liberación de una falla de fase a tierra es de gran importancia por las siguientes razones:

- a) La probabilidad de riesgo de choque eléctrico es mucho menor para tiempos rápidos de liberación de la falla que para situaciones en que la corriente de falla persiste por varios minutos.
- b) La posibilidad de severos daños o hasta la muerte es en gran manera reducida si la duración de la circulación de la corriente a través del cuerpo es muy breve. Se recomienda la ecuación $S_B = I_V^2 t_f$, aplicar el tiempo de liberación de la falla para la protección de respaldo y así tener mayor margen de seguridad.

En los sistemas de operación modernos se cuentan con el Recierre automático que es aplicado normalmente después de una falla a tierra. En tales circunstancias, al ocurrir una falla, una persona puede ser sujeta a un primer choque eléctrico sin daños considerables antes de que opere el Recierre. Después de que opere el primer Recierre, con un tiempo aproximado de 0.3 segundos, la persona puede quedar sujeta a un segundo choque. El segundo choque ocurre después de un corto intervalo de tiempo antes de que la persona se recupere del primer choque, pudiéndole causar daños o la muerte. Esto es debido a que el primer tiempo de duración total de los dos choques, se presentan como si fuera el de un solo choque.

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

Para calcular la sección transversal de conductor se debe de tener el valor de corriente máxima de falla a tierra que puede estar presente en el punto específico de la subestación. Conocidas el coeficiente de resistividad y las constantes características de cada material se aplican las siguientes ecuaciones según la norma oficial emitida por la Comisión Federal de Electricidad (NFR-011-CFE):

$$A_{mm^2} = I \sqrt{\frac{1}{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}}}$$

$$A_{kcmil} = I \sqrt{\frac{197.4}{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}}}$$

Dónde:

A= sección transversal

I= corriente rcm en kA (debe considerarse el incremento de este valor 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_0 = 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 $\mu\Omega\text{-cm}$.

t_c = tiempo de duración de la corriente en segundos

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

$K_0 = 1/\alpha_r$ o $(1/\alpha_0) - T_r$ en °C

Tensiones tolerables por el cuerpo humano.

En la figura 4 se indican las diferentes formas de contactos circunstanciales que una persona puede cometer entre dos puntos dentro de una subestación, presentándose para cada caso un tipo de tensión de contacto las cuales son:

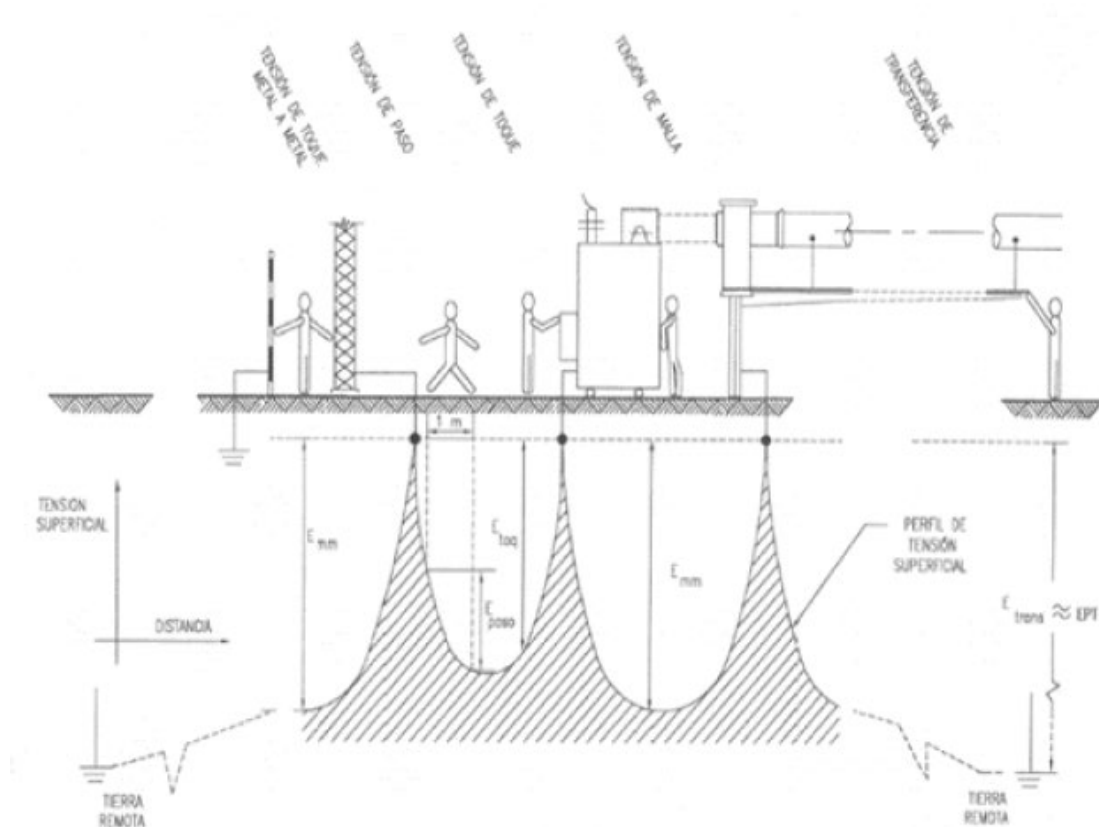


Figura 4.1 situaciones básicas de choque eléctrico.



- Tensión de toque o de contacto
- Tensión de toque metal a metal
- Tensión de transferencia
- Tensión de paso

Por lo tanto, es necesario establecer para cada tipo tensión de contacto una tensión tolerable por el cuerpo humano basándose en la corriente tolerable definida por las ecuaciones.

Tensión de toque tolerable.

Podemos definir a la tensión de toque como la máxima diferencia de tensión entre el punto de contacto de los pies de una persona que se encuentra parada en el área de la subestación y el punto de contacto de una o de sus dos manos al tocar la estructura metálica cuando ocurre una falla de fase a tierra.

En la figura 4.2 se muestra como la corriente de falla I_f es descargada en derivación por un lado directamente al sistema de tierra a través de la estructura metálica, con su componente I_g y, por otro lado a través de la persona con su componente I_b que será igual a la corriente tolerable por el cuerpo humano I_B .

En la figura 4.3 se presentan las diferentes impedancias del circuito equivalente para la tensión de toque, la terminal H es un punto con el mismo potencial que el sistema en el cual circula la corriente de falla y la terminal F , es el área pequeña sobre la superficie de la tierra que está en contacto con los dos pies de la persona. La corriente I_b fluye desde el punto H a través del cuerpo de la persona hasta tierra en el punto F . el teorema de Thevenin nos permite representar estas dos terminales (H y F) de la red por el circuito de la figura 4.4.

La tensión de Thevenin V_{th} es la tensión entre las terminales H y F cuando la persona no está presente. La impedancia de Thevenin Z_{th} es la impedancia del sistema vista desde los puntos H y F con fuentes de tensión del sistema en cortocircuito. La corriente que circula a través del cuerpo de una persona que está haciendo contacto entre los puntos H y F está determinada por la siguiente ecuación:

$$I_b = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_B} \dots\dots\dots \text{ecuación 4.1}$$

Dónde:

V_{th} = tensión de Thevenin (V)

R_B = resistencia de cuerpo humano (Ω)

Z_{th} = impedancia de Thevenin (Ω)

I_b = corriente que fluye por el cuerpo humano (A)

Como $I_b = I_B$ entonces la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano queda definida como:

$$E_{toque} = (R_B + Z_{th})I_B \dots \dots \dots \text{ecuación 4.2}$$

La resistencia del cuerpo humano R_B representa a la resistencia entre mano a mano, mano a pie o pie a pie según sea el caso. Normalmente a esta resistencia se le da un valor de:

$$R_B = 1000\Omega$$

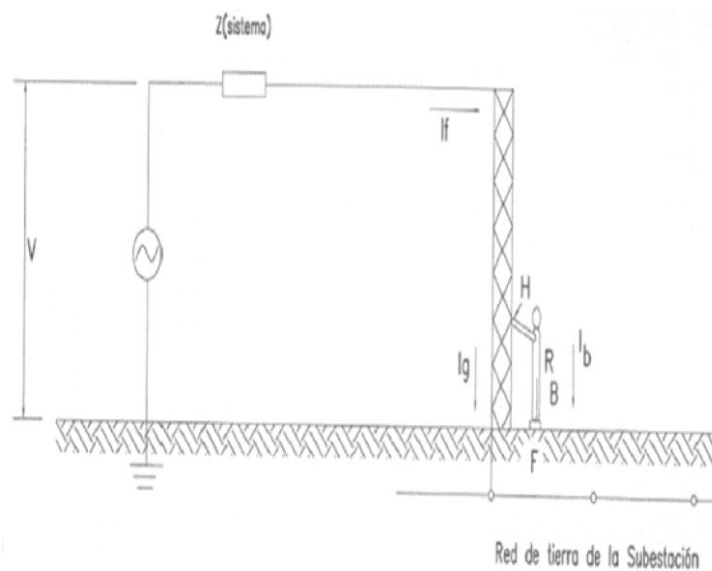


Figura 4.2 Riesgo para la tensión de toque.

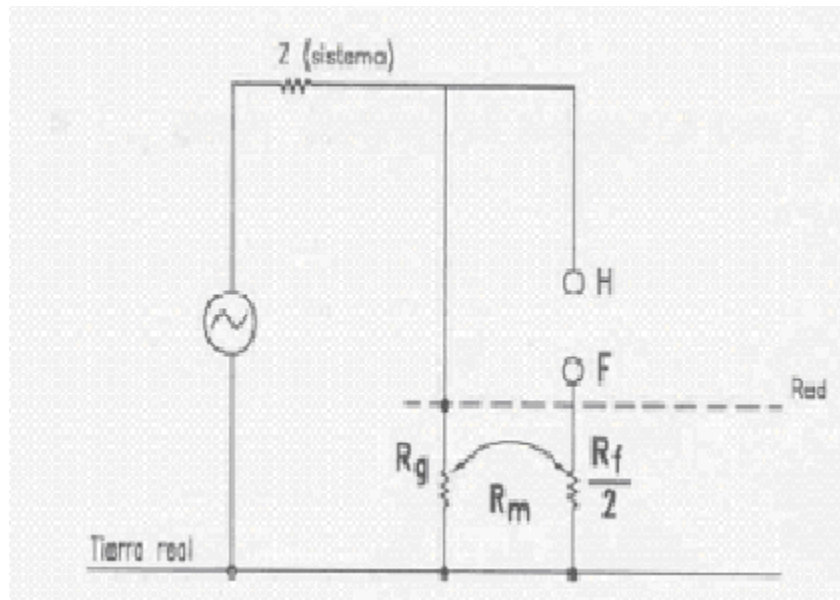


Figura 4.3 Impedancia para el circuito de la tensión de toque

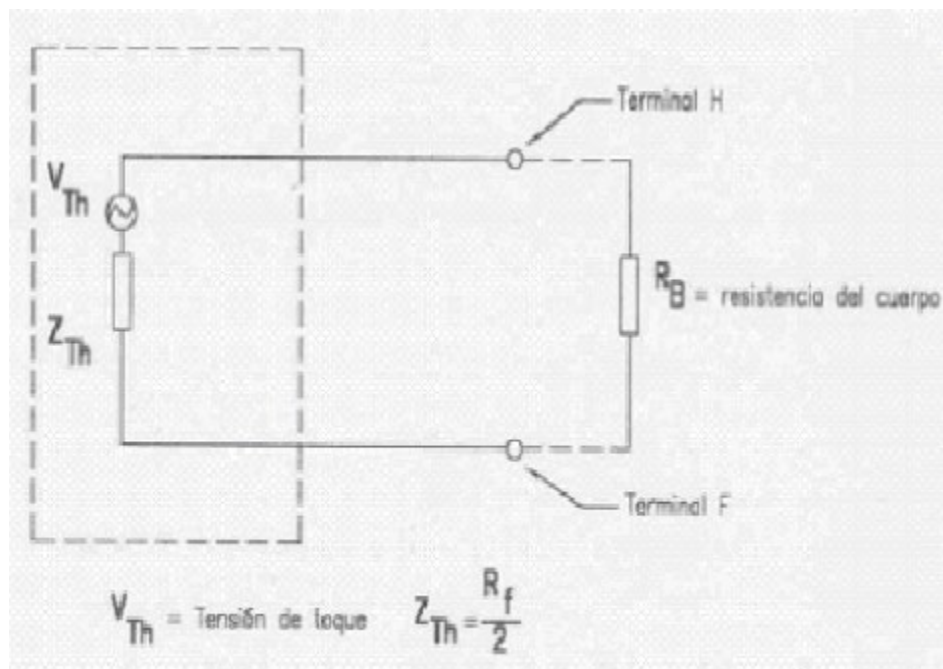


Figura 4.4 circuito equivalente para la tensión de toque.

El pie humano generalmente se representa como un disco metálico y la resistencia de contacto del suelo con los zapatos, calcetines, etcétera se desprecia. La resistencia de contacto de un disco metálico con la superficie del terreno con resistividad uniforme, se determina la siguiente ecuación:



$$R = \frac{\rho}{4b} \dots\dots\dots 4.3$$

Dónde:

ρ = resistividad del terreno (Ω -m)

b = radio del disco metálico

Normalmente se considera que representa al pie, el cual tiene un radio b de 0.08m.

Como objetivo de mejorar la resistividad superficial del terreno de la subestación, se agregan materiales aislantes que permiten elevar la resistencia a tierra del personal que transita por las áreas de la subestación (tabla 4.1), con las siguientes ventajas:

- Es una capa de resistividad alta
- Evita la formación de charcos de aceite, por fugas en equipos de potencia, abatiendo la posibilidad de propagar fuegos incipientes.
- Limita el crecimiento de pasto y maleza
- Mantiene la humedad del terreno

Evita la circulación de las personas que pretendan recorrer por las bahías de la subestación y provocar así un accidente.

Cuando se tiene una capa de 0.08 a 0.15 metros de material de alta resistividad, como grava esparcida por la superficie del terreno, encima de la red de tierra, se incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de la persona dentro del área de la subestación. Se obtiene un valor de la resistencia de uno de los pies con el terreno de:

$$R = \left[\frac{\rho}{4b} \right] C_s \dots\dots\dots 4.4$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \dots\dots\dots 4.5$$

Dónde:

ρ = resistividad del suelo debajo del material superficial (Ω -m)

ρ_s = resistividad del material de la capa superficial (Ω -m)

C_s = factor que relaciona el valor de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno. ρ

h = espesor del material de la capa superficial (m)

Tabla 4.1 Valores de resistividad de materiales aislantes.

Material	Resistividad a 20°C (Ω -m)
Ambar	5×10^{14}
Azufre	1×10^{14}
Baquelita	2×10^5 a 2×10^{14}
Cuarzo (fundido)	75×10^{16}
Ebonita	1×10^{13} a 2×10^{16}
Madera	1×10^8 a 2×10^{11}
Mica	1×10^{11} a 2×10^{15}
Vidrio	1×10^{10} a 2×10^{14}
Grava de galeana (metal negro)	3×10^3
Granito gneis	25×10^3
Grava Bolder	15×10^3
Piedra caliza	5×10^3
Grava moran	3×10^3
Roca base, dura	1190



Cuando no se tiene capa superficial en el área del sistema de tierra de la subestación se considera que:

$$\rho_s = \rho \qquad C_s = 1.0$$

Y la impedancia equivalente de Thevenin del circuito que se forma accidentalmente con la tensión de toque queda definida como:

$$Z_{th} = 1.5 C_s \rho_s$$

La tensión de toque tolerable por una persona que tiene un peso promedio de 70 kg es:

$$E_{\text{toque } 70} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \dots\dots\dots 4.6$$

Los cálculos son los mismos para una persona de 50 kg con la única diferencia de cambiar la constante de 0.157 por 0.116

Parámetros que recomienda la **IEEE Standard 80-2000**

1000Ω = resistencia recomendable del cuerpo humano.

Tensión de toque metal-metal tolerable.

La tensión de toque metal-metal se puede presentar cuando una persona parada en el área del sistema de red de tierra o que está tocando un objeto o estructura metálica aterrizada, hace contacto a la vez con un objeto o estructura metálica localizada en el área de la subestación pero que no está conectado al sistema de tierra. En la figura 4.5 se muestra un caso típico de toque metal- metal.

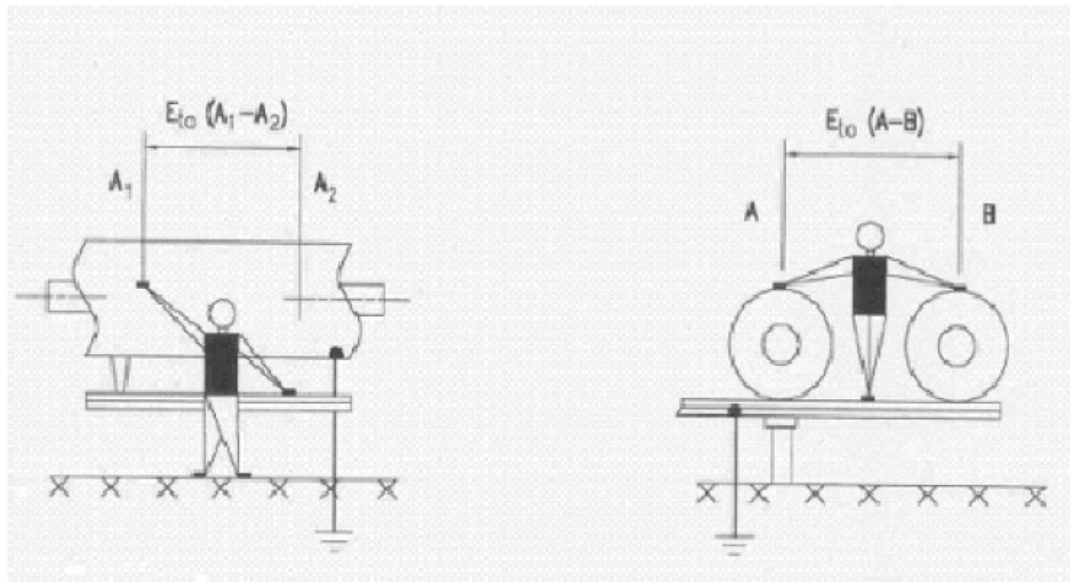


Figura 4.5 Situación típica de toque metal-metal.

La tensión de toque metal-metal tolerable por el cuerpo humano se puede obtener de la ecuación para la tensión de toque tolerable ecuación 3.7; en la figura 4.6 se indica los límites de la tensión de toque metal a metal. Para el contacto metal-metal tanto para el caso de mano a mano como el de mano a pie se considera que la resistividad de la superficie es:

$$\rho_s = 0$$

Por lo consiguiente la resistividad total del circuito accidental es igual a la resistencia del cuerpo R_B por lo que la tensión de toque metal a metal tolerable por el cuerpo para una persona con peso promedio de 70kg es:

$$E_{mm\ 70} = (1000) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{mm\ 70} = \frac{157}{\sqrt{t_f}} \dots\dots\dots 4.7$$

En el caso de una persona con peso promedio de 50 kg se cambia la constante por 0.116

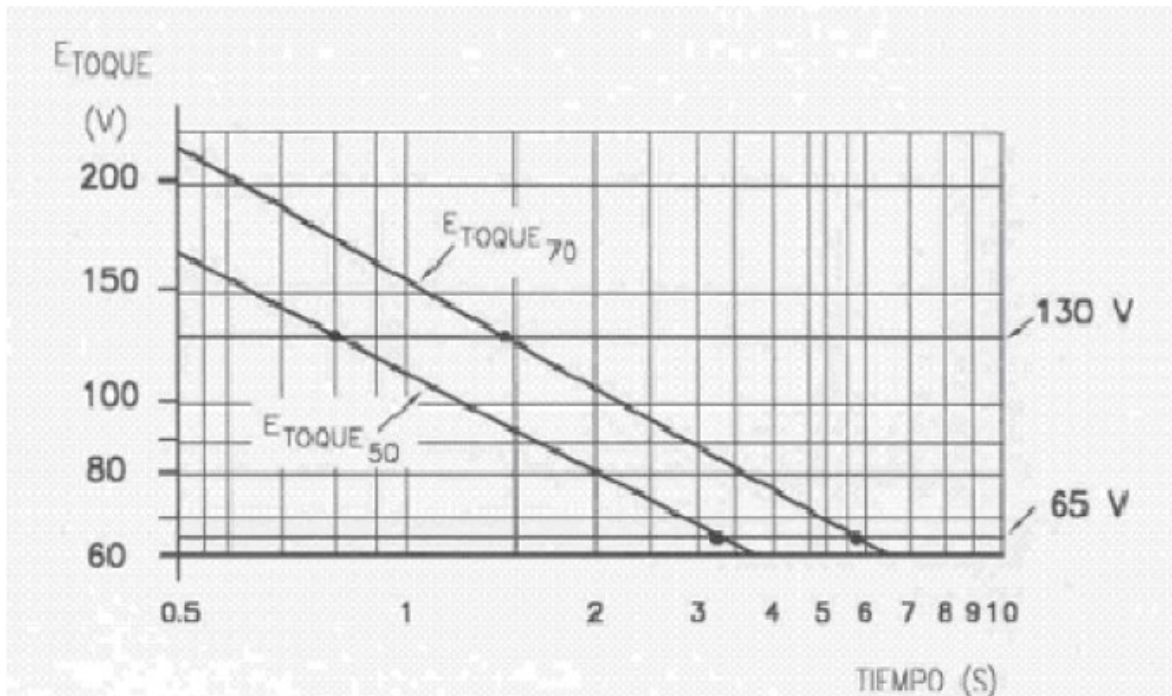


Figura 4.6 Límites de tensión de toque para contacto metal a metal y rangos típicos de tensiones a tierra de envolventes.

Tensión de transferencia tolerable.

La tensión de transferencia es un caso especial de la tensión de toque donde la tensión es transferida dentro o fuera de la subestación desde o hacia el punto remoto externo al área de la subestación.

La tensión de transferencia ocurre cuando una persona que está parada dentro del área de la subestación toca un conductor aterrizado en un punto remoto, o una persona que está parada en el punto remoto, toca un conductor que está conectado a la red de tierra de la subestación. En la figura 4.6 se muestra un caso típico de tensión de transferencia.

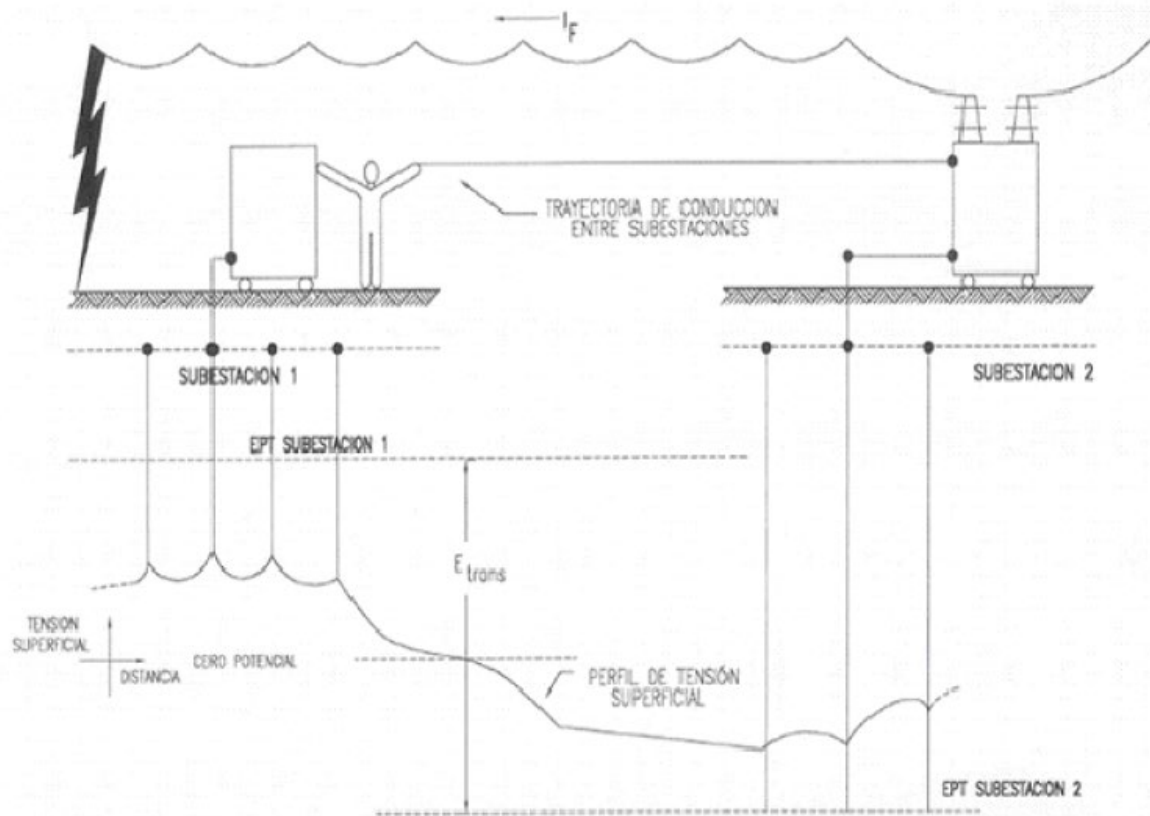


Figura 4.7 Situación típica de riesgo de tensión de transferencia.

Puede existir el riesgo de producirse una tensión de transferencia en los conductores de los circuitos de la subestación, en los hilos neutros de los circuitos de baja tensión, en los conduits, tuberías, cercas metálicas, rieles, etc.

Durante las condiciones de falla, la tensión de transferencia resultante puede ser igual o exceder a la máxima elevación de tensión de la red E_R . La máxima elevación de tensión de la red es el máximo potencial eléctrico que se puede tener en un punto de la red del sistema de tierra de una subestación y un punto que esta al mismo potencial de un sistema de tierra de una subestación remota. Esta tensión se determina con la siguiente ecuación:

$$E_R = R_g I_g \dots\dots\dots 4.8$$

Dónde:

E_R = máxima elevación de tensión de la red del sistema de tierra (V)



R_g = resistencia a tierra de la red del sistema de tierra (Ω)

I_g = corriente de falla que circula en la red del sistema de tierra (A)

La tensión de transferencia puede exceder la suma de las máximas elevaciones de tensión de la red de ambas subestaciones. Por lo que es impráctico y hecho posible, reducir los potenciales de transferencia a la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano en el diseño de red de tierra. Para evitar el riesgo de las tensiones de transferencia se utilizan dispositivos de aislamiento y neutralización y también se deben tener ciertas precauciones en la puesta a tierra de algunos elementos de la subestación.

Tensión de paso tolerable.

Podemos definir a la tensión de paso como la máxima diferencia de potencial entre los puntos que están haciendo contacto los dos pies de una persona, con una separación de un metro, que se encuentra caminando en el área de la subestación al ocurrir una falla de fase a tierra.

La figura 4.8 muestra la corriente de falla que es descargada a tierra. La corriente I_b fluye desde el punto F1 en el que pisa uno de los pies de la persona que se encuentra en la subestación y circulando a través de su cuerpo llega hasta otro punto F2 en el que se encuentra pisando su otro pie.

En la figura 4.9 se representa el teorema de Thevenin las terminales F1 y F2. La tensión de Thevenin V_{TH} es la tensión entre las terminales F1 y F2 cuando la persona no está presente.

La impedancia Z_{TH} es la impedancia del sistema vista desde las terminales F1 y F2 con las fuentes de tensión del sistema en cortocircuito. La corriente I_b que circula por el cuerpo de una persona está determinada por la ecuación 4.1

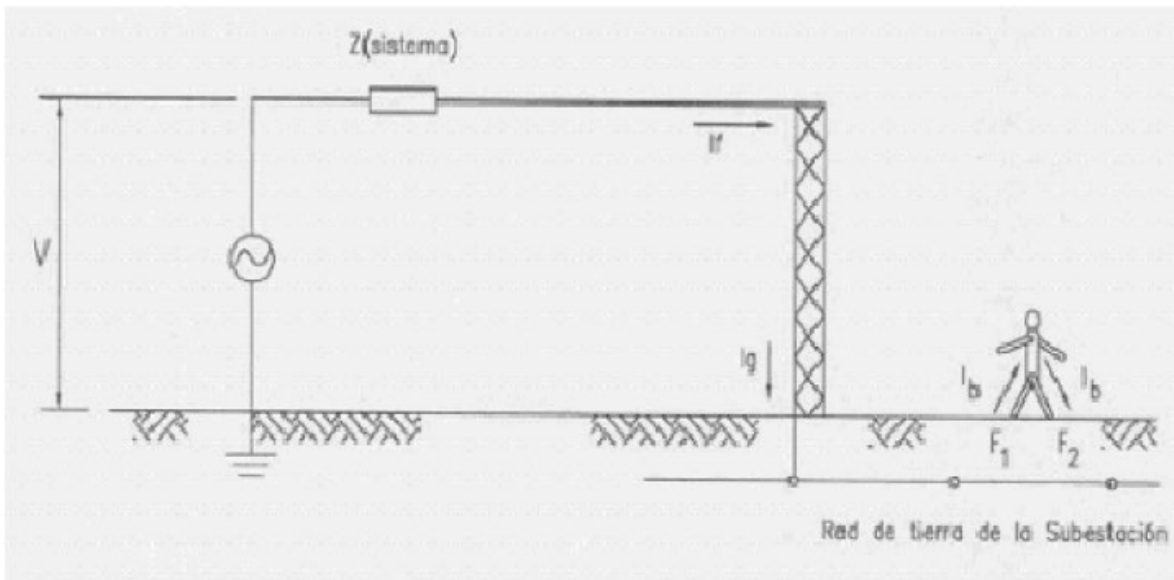


Figura 4.8 riesgo para la tensión de paso.

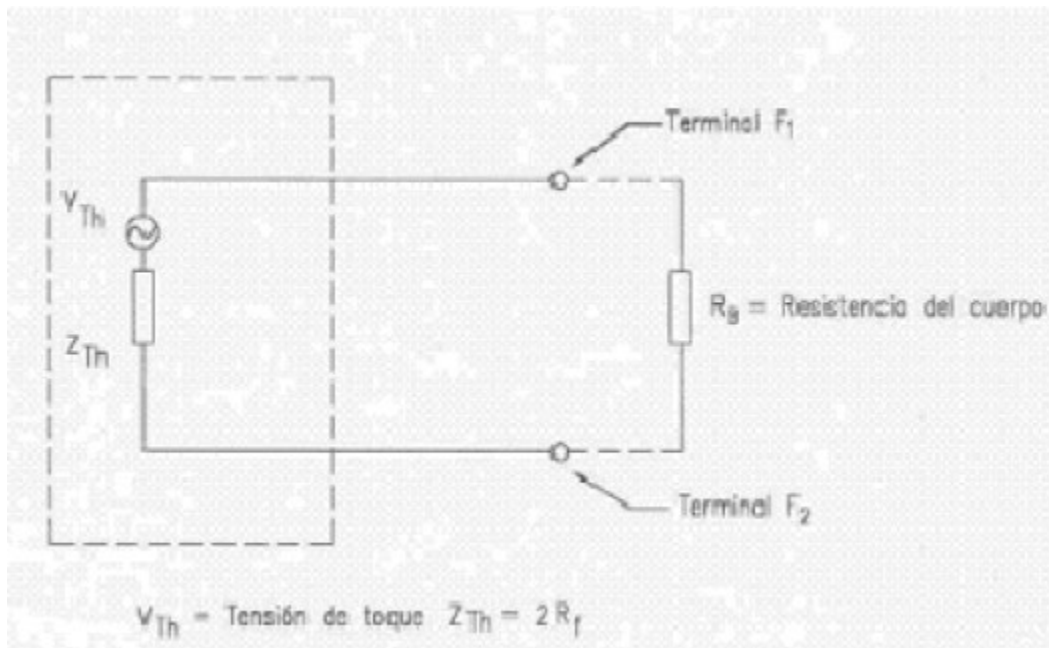


Figura 4.9 circuito equivalente para la tensión de paso.

La impedancia de Thevenin del circuito se forma accidentalmente con la tensión de paso es:

$$Z_{TH} = R_s \dots\dots\dots 4.9$$



$$R_s = 2 R_f \dots\dots\dots 4.10$$

R_s = resistencia de contacto con el suelo de los dos pies en serie

Sustituyendo de la ecuación 4.10 en la ecuación 4.2, podemos obtener la tensión de paso tolerable por el cuerpo humano siendo esta:

$$E_{\text{paso}} = (R_B + 2R_f) I_B \dots\dots\dots 4.11$$

Tomando en cuenta las consideraciones que se indican en la “importancia de la malla” sobre el pie humano y lo referente a la capa superficial, la impedancia equivalente de Thevenin del circuito que se forma accidentalmente con la tensión de paso es:

$$Z_{\text{th}} = 6C_s\rho_s \dots\dots\dots 4.12$$

La tensión de paso tolerable por una persona que tiene un peso promedio de 70 kg es:

$$E_{\text{paso } 70} = (1000+6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \dots\dots\dots 4.13$$

Para personas de 50 kg la constante es 0.116 en lugar de 0.157

Selección del conductor de la red de tierra.

Cada uno de los elementos del sistema del sistema de tierra incluyendo los conductores de la red, los cables de puesta a tierra de los equipos y estructuras y electrodos, deben ser seleccionados de tal manera que presenten las siguientes características:

- a) Tengan la superficie conductividad para que no contribuyan substancialmente a producir diferencias de potenciales locales.
- b) Resistencia a la fusión y deterioro en las condiciones más desfavorables de magnitud y tiempo de duración de corriente de falla que pueden quedar expuestas.
- c) Confiables y con una alta resistencia mecánica, especialmente en aquellos lugares en que puedan quedar expuestos a un daño.
- d) Sean capaces de mantener sus características aun cuando sean expuesto a la corrosión.



El conductor utilizado en los sistemas de tierra es cable de cobre con sección transversal mínima de 107.2 mm² (No. 4/0); se ha seleccionado como mínimo esta sección transversal por razones mecánicas, por su resistencia térmica y conductividad.

Se utiliza el cobre por su mejor conductividad tanto eléctrica como térmica y sobre todo por ser resistente a la corrosión debido a que es catódico respecto a otros materiales que pudieran estar enterrados cerca de él.

La sección transversal del conductor para un sistema de tierra requerida, en función de la elevación de temperatura de corto tiempo, la magnitud y el tiempo de duración de la falla y cuando se conocen las constantes de material del conductor, se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$I = A_r \sqrt{\left(\frac{T_{cap} \times 10^{-4}}{t_f \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_\alpha}\right)} \dots\dots\dots 4.14$$

Dónde:

I = corriente de falla simétrica eficaz

A_r = área de sección transversal del conductor (mm²)

T_m = máxima temperatura permisible del material (°C)

T_α = temperatura ambiente (°C)

t_f = temperatura de referencia para las constantes del material (°C)

α₀ = coeficiente de resistividad térmica a 0°C (1/°C)

α_r = coeficiente de resistividad térmica a la t_f (1/°C)

ρ_r = resistividad del conductor a tierra referido a la t_f (μΩ-cm)

K₀ = 1/α₀ o también (1/α_r) - t_f en °C

T_{cap} = capacidad térmica por unidad de volumen (J/(cm³ °C))

α_r y ρ_r están a la misma temperatura de referencia t_f

Para conductores de cobre a cierta temperatura referida y con conductividad de 97%, se tienen los siguientes valores:



$$\alpha_r = 0.0031 \text{ 1/}^\circ\text{C con } t_f = 20^\circ\text{C}$$

$$K_0 = 242 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_r = 1.78 \text{ }\mu\Omega\text{-cm con } t_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{cap} = 3.42 \text{ J/(cm}^3 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Despejando el área de sección transversal del conductor A_r de la ecuación 4.14 :

$$A_r = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{T_{cap} \times 10^{-4}}{t_f \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}} \dots\dots\dots 4.15$$

Resistencia de la red de tierra.

La resistencia de la red de tierra de la subestación es un factor muy importante para reducir los gradientes de tensión que pueden presentar en condiciones de falla, debido a que la mayor densidad de corriente se presenta en la periferia de la red.

Por lo general, en subestaciones de transmisión y subtransmisión se pretende que el valor de la resistencia de red de tierra sea menor que un ohm. En subestaciones de distribución se considera aceptable entre uno y cinco ohms, pero desde luego se debe tratar de abatir lo más posible el valor de la resistencia.

Considerando una aceptable aproximación, el valor de la resistencia de la red de tierra, para suelo uniforme, se determina con la siguiente ecuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{4}} \dots\dots\dots 4.16$$

Cuando se considera la longitud de los conductores de la malla (conductores horizontales) combinada con los electrodos de tierra, la resistencia es:



Dónde:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{L_T}} \dots\dots\dots 4.17$$

L_T = longitud total de la red, incluyendo los conductores horizontales y verticales (m)

Para una mayor exactitud, se adiciona la profundidad de la red de tierra, por lo tanto:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{10A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \dots\dots\dots 4.18$$

Dónde:

h = profundidad de la red de tierra (m)

A = área de la superficie de ocupada por la red de tierra (m²)

L_T = longitud total de la red, incluyendo los conductores horizontales y verticales (m)

Tensión de malla máxima.

La tensión de malla máxima, es la tensión de toque en el centro de una malla de una red, esta tensión es mayor conforme la malla más alejada del centro de la red, por lo que la tensión de malla máxima se tendrá en las mallas de las esquinas de la red del sistema de tierra. Este incremento depende del tamaño de la red, número y localización de las varillas de tierra, separación entre conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores y perfil de la resistividad del terreno.

Debido a que la máxima tensión de malla se encuentra en las esquinas de la red, en el diseño de un sistema de tierra solo se considera esta tensión de malla con el estudio y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} \dots\dots\dots 4.19$$

Dónde:

E_m = tensión de malla (V)

K_i = factor de ajuste de la geometría de la red



K_m = factor de espaciamento para la tensión de malla

L_M = longitud efectiva de los conductores de la red (m), para la tensión de malla

I_G = corriente de falla que circula en la red del sistema de tierra (A)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_r} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_r} - \frac{h}{4d_r} \right) + \frac{K_H}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \dots\dots\dots 4.20$$

Dónde:

D = espaciamento entre conductores paralelos

d_r = diámetro del conductor de la red (m)

K_H = factor de ajuste de peso y efectos internos en la red

K_h = factor de ajuste de peso y profundidad de la red

h = profundidad de los conductores horizontales enterrados de la red de tierra (m)

Con varillas de tierra a la largo del perímetro de la red, con varillas de tierra en las esquinas de la red o con ambas condiciones en el área de la red:

$$K_{ii} = 1$$

Sin varillas de tierra o con pocas varillas espaciadas en la red, pero ninguna en las esquinas o en el perímetro de la red del sistema de tierra:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \dots\dots\dots 4.21$$

Dónde:

n = factor de geometría o numero efectivo de conductores paralelos.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \dots\dots\dots 4.22$$

h_0 = 1.0 m profundidad de referencia de la red



En el efecto de conductores paralelos n en una red dada o irregular se representa por el número de conductores paralelos de una red rectangular equivalente:

$$n = n_a n_b n_c n_d \dots\dots\dots 4.23$$

Dónde:

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \dots\dots\dots 4.24$$

$n_b = 1$ para redes cuadradas.

$n_c = 1$ para redes cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$ para redes cuadradas, rectangulares y en forma de L.

De lo contrario:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \dots\dots\dots 4.25$$

$$n_c = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{0.7 A} \dots\dots\dots 4.26$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \dots\dots\dots 4.27$$

Dónde:

L_c = longitud total de conductores horizontales de la red (m)

L_p = longitud perimetral de la red (m)

A = área cubierta por la red del sistema de tierra (m²)

L_x = longitud máxima de la red sobre el eje X (m)

L_y = longitud máxima de la red sobre el eje Y (m)



D_m = distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la red (m)

El factor de ajuste de la geometría o de irregularidad de la red K_i en función de n está definido como:

$$K_i = 0.644 + 0.148n \dots\dots\dots 4.28$$

Para las redes sin electrodos o con pocos electrodos esparcidos en la red, pero ninguno localizado en las esquinas o a lo largo del perímetro de la red, la longitud efectiva L_M de los conductores enterrados de la red es:

$$L_M = L_C + L_R \dots\dots\dots 4.29$$

Dónde:

L_R = longitud total de todas las varillas de tierra (m).

Para las redes con varillas de tierra en las esquinas, como también a lo largo del perímetro y distribuidos en el área de la red, la longitud efectiva L_M de los conductores enterrados incluyendo las varillas, está determinada por:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \dots\dots\dots 4.30$$

Dónde:

L_r = longitud de cada varilla de tierra (m)

Tensión de paso máxima.

Es la tensión de paso entre un punto sobre el exterior de una de las esquinas de la red y un punto diagonalmente a un metro fuera de la red. Las tensiones de paso son inherentemente menos peligrosas que las tensiones de malla. Pero cuando la seguridad del sistema de tierra solo se consigue colocando sobre la superficie una capa de alta resistividad (como roca triturada o piedras de río) y dicha capa no se prolonga al exterior de la red, los potenciales fuera de la red pueden ser peligrosos. Por lo que se recomienda que la tensión de paso obtenida se compare con la tensión de paso tolerable, una vez que se haya obtenido una tensión de malla menor que la tolerable. En caso de que se obtenga en este punto un potencial de paso mayor al tolerable, se puede evitar extendiendo la capa de



material de alta resistividad hacia afuera de la cerca o eliminando esquinas o protecciones agudas en la red apropiadamente. La tensión de paso se determina con la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_S} \dots\dots\dots 4.31$$

Dónde:

E_s = tensión de paso (V)

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \dots\dots\dots 4.32$$

Dónde:

L_S = longitud efectiva de los conductores de la red (m), para la tensión de paso.

Considerando el potencial a un metro de la esquina más alejada de la red y el conductor enterrado a una profundidad de:

$$0.25m < h < 2.5m$$

K_s se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \dots\dots\dots 4.33$$

Dónde:

K_s = factor de espaciamiento para la tensión de paso.

Datos obtenidos en campo y datos generales de la subestación.

Empresa: Comisión Federal de Electricidad.

Nombre de la subestación: Subestación Eléctrica Angostura.

Relación de transformación: 400kv/115kv.

Dirección: Km 60 carretera Tuxtla-Angostura; municipio Venustiano Carranza.

Impedancia equivalente del sistema de secuencia positiva Z_1 :

Barras colectoras de 400kv: 0.72907+j17.1378

Barras colectoras de 115kv: 0.36594 + j5.59142

Impedancia equivalente del sistema de secuencia cero Z_0 :

Barras colectoras de 400kv: 0.24608+j7.42991

Barras colectoras de 115kv: 0.16014 + j5.51862

Corriente de falla de fase a tierra $3I_0$

Barras colectoras de 400kv: 17.487 kA

Barras colectoras de 115kv: 12.03 kA

Tiempo de liberación de la falla t_f : 0.05 seg.

Factor de crecimiento del sistema f_c : 1.6

Temperatura ambiente: 35°C

Área cubierta por la red de tierra A: 491.5m x 197.5m

Resistencia promedio del terreno ρ : 50Ω-m

Profundidad de la red de tierra h: 0.5 m

Cálculo de la sección transversal del conductor.

La condición más crítica de corriente de corto circuito es en la falla monofásica del lado de baja tensión de la subestación. Y considerando el factor de crecimiento del sistema:

$$I_f = 3I_0 = 17.487 \text{ kA}$$

$$I_f = 1.6 \times 17.487 \text{ kA}$$

$$I_f = 27.98 \text{ kA}$$

De la ecuación 4.15 se calcula la sección transversal del conductor, y se consideran características para conductores de cobre con 97% de conductividad, que vienen determinadas en el anexo 1.

$$A_r = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{T_{cap} \times 10^{-4}}{t_f \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}} \dots (4.15)$$

$$\alpha_r = 0.00367 \text{ 1/}^\circ\text{C con } T_r = 35^\circ\text{C}$$

$$K_0 = 1/\alpha_r - T_r = 1/0.00367 - 35^\circ\text{C} = 237^\circ\text{C}$$

$$T_m = 1084^\circ\text{C}$$

$$\rho_r = 1.78 \mu\Omega\text{-cm con } t_f = 35^\circ\text{C}$$

$$T_{cap} = 3.42 \text{ J}/(\text{cm}^3 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$A_r = \frac{27.98}{\sqrt{\left(\frac{3.42 \times 10^{-4}}{0.2 \times 0.00367 \times 1.78}\right) \ln\left(\frac{237 + 1084}{237 + 35}\right)}} = 43.5 \text{ mm}^2$$

Con la sección transversal obtenida se puede utilizar un conductor con sección transversal de 43.501 mm² (2/0 AWG), pero por norma se recomienda utilizar un conductor con sección transversal de 107.2 mm² (4/0 AWG), por resistencia mecánica.

Cálculo de tensiones de toque y de paso tolerable por el cuerpo humano.

Tomando en cuenta que la subestación tiene acceso restringido a personal no autorizado o previamente acreditado para estar dentro de esta, se considera cálculos para personas de 50 y 70 kg, estos cálculos ayudan a obtener la tensión de paso y de toque tolerables por el cuerpo humano. Para el diseño preliminar se considera que la Subestación aún no tiene capa superficial ($\rho_s = \rho, C_s = 1$)

$$E_{\text{toque } 70} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{\text{toque } 70} = (1000 + 1.5(1)(50)) \frac{0.157}{\sqrt{0.2}}$$



$$E_{\text{toque } 70} = \underline{377.39 \text{ V}}$$

$$E_{\text{paso } 70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{\text{paso } 70} = (1000 + (6)(1)(50)) \frac{0.157}{\sqrt{0.2}}$$

$$E_{\text{paso } 70} = \underline{456.38 \text{ V}}$$

Los cálculos son los mismos para una persona de 50 kg con la única diferencia de cambiar la constante de 0.157 por 0.116

$$E_{\text{toque } 50} = \underline{278.93 \text{ V}}$$

$$E_{\text{paso } 50} = \underline{337.2 \text{ V}}$$

Determinación de la longitud del conductor de la red.

Para la malla de tierra es necesario procurar que esta sea lo más cuadrada posible, por lo que la relación del número de mallas sobre el eje X y las del eje Y, deben de corresponder aproximadamente a la relación entre el largo y el ancho de la red.

$$\frac{\text{eje } x}{\text{eje } y} = \frac{\text{largo de la red}}{\text{ancho de la red}} = \frac{491.5}{196.5} = 2.50$$

Se considera en forma tentativa 11 mallas en el eje X, por lo tanto el número en el eje Y será:

$$\text{mallas en el eje } y = \frac{11}{2.50} \approx 4$$

Por lo que en forma preliminar la red estará constituida por 9 en el eje Y, y 21 en el eje X, teniendo una longitud total del conductor para la red y una separación entre conductores paralelos de:

$$L = 11 \times 491.5 + 4 \times 196.5$$

$$L = 6192.5$$

$$D = \frac{2l_1l_2}{L - l_1 - l_2}$$

Dónde:

D = separación preliminar en conductores paralelos.

l_1 = largo de la red

l_2 = ancho de la red

$$D = \frac{2(491.5)(196.5)}{(6192.5) - 491.5 - 196.5}$$

$$\underline{D=35.1 \text{ m}}$$

Cálculo de la resistencia de la red.

De acuerdo con la siguiente ecuación la resistencia de la red será:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{10A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$R_g = (50) \left[\frac{1}{6192.5} + \frac{1}{\sqrt{10(96579.75)}} \left(1 + \frac{1}{1+0.5\sqrt{20/96579.75}} \right) \right]$$

$$R_g = \underline{0.109\Omega}$$

Corriente máxima de la red.

Se obtiene el factor de decremento que se establece con la siguiente ecuación:

$$X = 0.36594 + 0.72907 + 0.72907$$

$$X = 1.82408$$

$$R = 5.59142 + 17.1378 + 17.1378$$

$$R = 39.89702$$

$$T_a = 1.82408 / (2 \times \pi \times 60 \times 39.89702)$$

$$T_a = 0.0001 \text{ segundos}$$

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

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.02}{0.05} \left[1 - e^{-\frac{2(0.05)}{0.0001}} \right]}$$

$$\underline{D_f = 1.4}$$

Aplicando el factor de decremento a la corriente de corto circuito I_f , se obtiene la corriente máxima de la red con las siguientes ecuaciones.

$$I_F = D_f I_f$$

$$I_F = 1.4 \times 27.98 \text{ kA}$$

$$\underline{I_F = 39.172 \text{ kA}}$$

$$I_G = I_F$$

Comparación de la tensión máxima de la red con la tensión máxima de toque tolerable por el cuerpo humano.

$$E_R = R_g I_G$$

$$E_R = 0.109 \Omega \times 39172 \text{ kA}$$

$$E_R = 4269.748 \text{ V}$$

$$E_R > E_{\text{toque}70}$$

$$\underline{4269.748 \text{ V} > 377.39 \text{ V}}$$

Este resultado nos indica que debe seguir con el análisis hasta llegar a esta condición inversa.

Cálculo de las tensiones máximas de malla y de paso en la red del sistema de tierra.

Para este cálculo es necesario obtener el factor de geometría n a partir de las ecuaciones siguientes y considerando una red rectangular tenemos que:

$$n = n_a n_b n_c n_d$$

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

$$n_a = \frac{2(6192.5)}{2 \times 491.5 + 2 \times 196.5} = \underline{9.0}$$

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

$$n_b = \sqrt{\frac{2 \times 491.5 + 2 \times 196.5}{4\sqrt{96579.75}}} = \underline{1.107}$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 9 \times 1.107 \times 1 \times 1 = \underline{9.963}$$

Para sistemas de tierra sin varillas o con pocas esparcidas dentro del área de la red, pero ninguna en las esquinas o en el perímetro de la red, como en este caso, tenemos las siguientes ecuaciones:

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

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(9.963))^{2/9.963}} = \underline{0.548}$$

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = \underline{1.22}$$

$$d_r = \sqrt{\frac{4 A_r}{\pi}}$$

$$d_r = \sqrt{\frac{4 (107.2)}{\pi}} = 11.68 \text{ mm} = \underline{0.01168 \text{ m}}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_r} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_r} - \frac{h}{4d_r} \right) + \frac{K_H}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{35.1^2}{16(0.5)(0.01168)} + \frac{(35.1+2(0.5))^2}{8(35.1)(0.01168)} - \frac{0.5}{4(0.01168)} \right) + \frac{0.548}{1.22} \ln \left(\frac{8}{\pi(2(9.963)-1)} \right) \right] = \underline{1.8096}$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(9.963) = \underline{2.1185}$$

Como en el diseño preliminar no se consideran varillas de tierra, tenemos:

$$L_M = L_c = 6192.5 \text{ m}$$

De la ecuación $E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$

$$E_m = \frac{(50)(39172)(1.8096)(2.1185)}{6192.5} = \underline{1,212.525 \text{ V}}$$

La tensión de paso máxima en la red la obtenemos de las siguientes ecuaciones:

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{35.1+0.5} + \frac{1}{35.1} (1 - 0.5^{9.963-2}) \right] = \underline{0.336}$$



$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R$$

$$L_S = 0.75(6192.5) + 0.85(0) = \underline{4644.375}$$

$$E_S = \frac{\rho K_S K_i I_G}{L_S}$$

$$E_S = \frac{(50)(0.336)(2.1185)(39172)}{4644.375} = \underline{300.183 \text{ V}}$$

Comparación de la tensión de malla máxima en la red del sistema de tierra con la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano.

$$E_m > E_{\text{toque } 70}$$

$$\underline{1,212.525 \text{ V} > 377.39 \text{ V}}$$

Como la tensión de malla máxima es mayor que la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano, es necesario corregir el diseño preliminar continuando con el paso 5.10

Modificación de diseño preliminar.

Se tiene que verificar que la longitud del conductor de la red es mayor que la longitud mínima requerida, para que la tensión de malla sea menor que la de toque tolerable por el cuerpo humano, así que está definida en la siguiente ecuación:

$$L_C = \frac{\rho K_m K_i I_G \sqrt{t_f}}{(157 + 0.235 C_S \rho_S)}$$

$$L_C = \frac{(50)(1.8096)(2.1185)(39172)\sqrt{0.05}}{(157 + 0.235(1.0)(50))} = \underline{9,949.426 \text{ m}}$$

$$\underline{9,949.426 \text{ m} \gg 6192.5 \text{ m}}$$

Como la longitud mínima requerida del conductor de la red es mucho mayor a la utilizada en el diseño preliminar, sería muy costosa su instalación, por lo que se recomienda que se utilice una capa de 15 cm de espesor de material aislante que

cubra la red del sistema de tierra. En este caso empleamos un material con una resistividad de 15,000 Ω -m (grava bolder).

Por lo tanto, recalculamos las tensiones tolerables por el cuerpo humano, teniendo:

$$\rho_s = 15,000 \Omega - m$$

$$\text{Donde: } C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{50}{15000}\right)}{2(0.05) + 0.09} = 0.5279$$

$$\text{Ahora en la ecuación: } E_{\text{toque } 70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{\text{toque } 70} = (1000 + 1.5(0.5279)(15000)) \frac{0.157}{\sqrt{0.05}} = \underline{9,041.795 \text{ V}}$$

$$E_{\text{toque } 50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{\text{toque } 50} = (1000 + 1.5(0.5279)(15000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.05}} = \underline{6,680.56 \text{ V}}$$

Con lo cual se cumple las siguientes condiciones.

$$E_m < E_{\text{toque } 70}$$

$$E_m < E_{\text{toque } 50}$$

$$\underline{1,212.525 < 9,041.795 \text{ V}}$$

$$\underline{1,212.525 < 6,680.56 \text{ V}}$$

Comparando la máxima elevación de tensión de la red con la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano se demuestra que:

$$E_R < E_{\text{toque } 70}$$

$$E_R < E_{\text{toque } 70}$$

$$\underline{4,269.748 \text{ V} < 9,041.795 \text{ V}}$$

$$\underline{4,269.748 \text{ V} < 6,680.56 \text{ V}}$$

Por lo que es necesario instalar dispositivos de aislamiento o neutralización para los circuitos de comunicación, en las tuberías conduit, tuberías de agua, rieles, cercas metálicas, etc.

La longitud mínima del conductor para que la red del sistema de tierra sea segura, es:

$$L_c = \frac{(50)K_m K_i I_G \sqrt{t_f}}{(157 + 0.235 C_s \rho_s)}$$

$$L_c = \frac{(50)(1.8096)(2.1185)(39172)\sqrt{0.05}}{(157 + 0.235(0.5279)(15000))} = \underline{832.06 \text{ m.}}$$

Como la longitud mínima del conductor de la red (para que la tensión máxima este dentro de los límites de seguridad) es menor que la utilizada en el diseño preliminar, se continúa con el diseño de la red de tierra en Subestación Angostura.

$$832.06 \text{ m} < 6192.5 \text{ m}$$

Comparación de la tensión máxima de paso de la red del sistema de tierra con la tensión de paso tolerable por el cuerpo humano.

Cuando se carece de un material aislante en la superficie del terreno, se observa que:

$$E_s < E_{\text{paso } 70}$$

Pero cuando se coloca una capa de material aislante en la superficie del terreno, la tensión de paso tolerable por el cuerpo humano será:

$$E_{\text{paso } 70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{\text{paso } 70} = (1000 + 6(0.5279)(15000)) \frac{0.157}{\sqrt{0.05}} = \underline{34,060.8 \text{ V}}$$



$$E_{\text{paso } 50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}$$

$$E_{\text{paso } 50} = (1000 + 6(0.5279)(15000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.05}} = \underline{25,165.9 \text{ V}}$$

Por lo tanto se cumple la siguiente condición:

230.5 V << 34,060.8 V para personas de 70 kg en adelante

230.5 V << 25,165.9 V para personas de 50 kg en adelante

Como la tensión de paso máxima de la red es menor que la tensión de paso tolerable por el cuerpo humano, para ambos casos, no es necesario extender la capa de grava o roca triturada hacia fuera del perímetro de la red de tierra.

Validación de cálculos obtenidos bajo diseño contra datos reales obtenidos bajo prueba.

Comparación de:	Diseñada	Real
sección transversal del conductor	107.2 mm ² (4/0 AWG)	107.2 mm ² (4/0 AWG)
tensiones de toque	6,680.56 V	5,907 V
tensiones de paso	25,165.9 V	28076.16 V
tensiones de malla	1,212.525 V	1,539 V
longitud del conductor de la red	832.06 m	943 m
resistencia de la red	0.109Ω	0.87 Ω
Corriente máxima de la red	39.172 kA	35.152 kA



Diseño de red de tierra.

Para la red de tierra en subestaciones de 400 kV en el lado primario la cuadrícula se define por la siguiente ecuación:

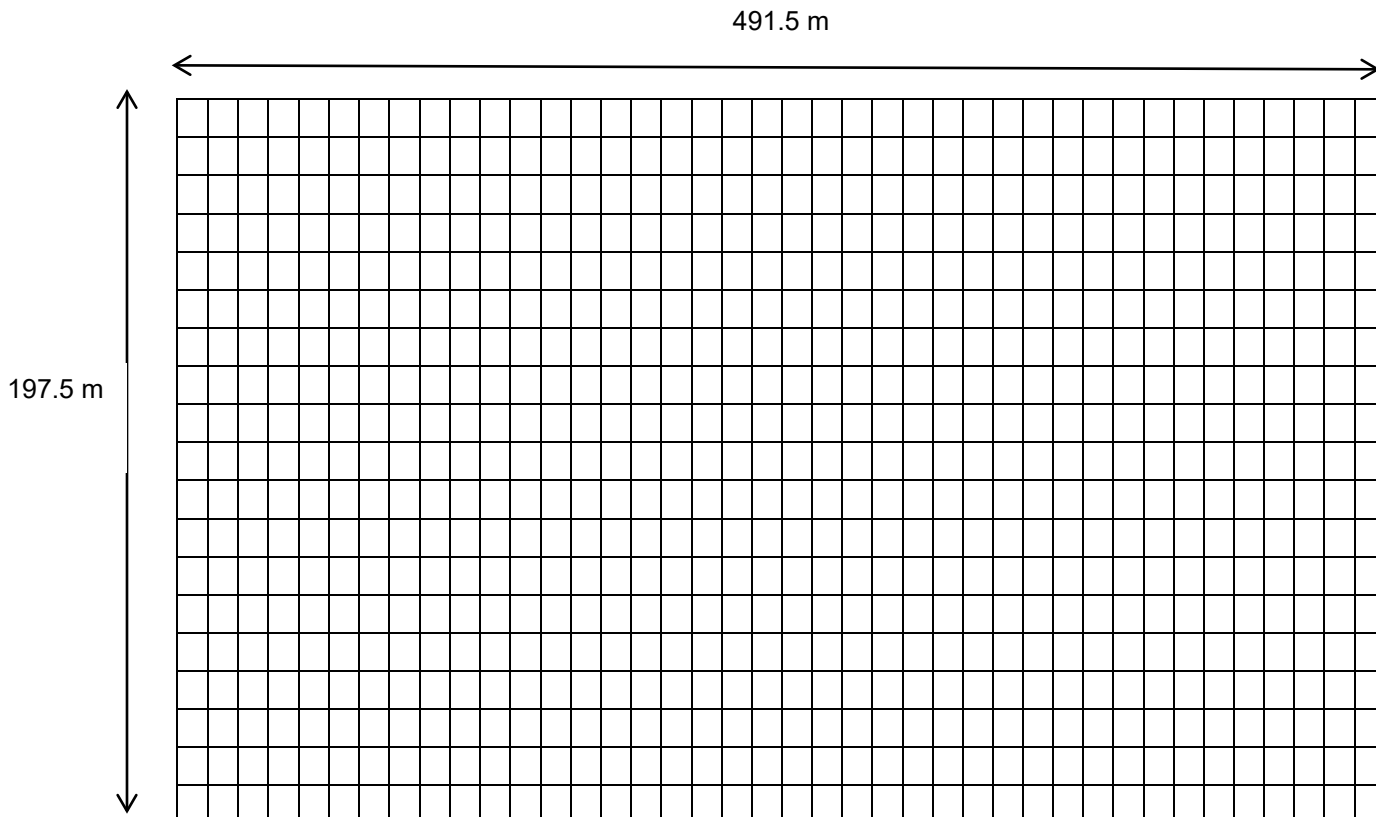
$$\text{Número de conductores en lado X: } \frac{\text{metros de eje X}}{10 \text{ m}} = \frac{491.5 \text{ m}}{10 \text{ m}} = 49 \text{ conductores}$$

$$\text{Número de conductores en el lado Y: } \frac{\text{metros de eje y}}{10 \text{ m}} = \frac{197.5 \text{ m}}{10 \text{ m}} = 20 \text{ conductores}$$

Quedando una rejilla de 10 m x 9.8 m con dichas medidas se encuentran dentro de la norma de CFE (anexo 1). El número de varillas esta dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Numero de varillas} = (\text{núm. de conductores en eje X}) (\text{núm. de conductores eje Y})$$

Con la cual nos da un total de 980 varillas ubicadas en cada cruce de conductores



De acuerdo con la norma de cfe NRF-011-CFE-2004 la rejilla de la red de tierra para subestaciones de 400 kv en el primario debe de existir un espacio entre cada conductor de 10x10 metros como se muestra en la figura. Anexo 1



Conclusión

La sección transversal del conductor tanto la diseñada como la real tienen la misma puesta que por norma de CFE este es el calibre mínimo del conductor (107.2 mm^2 o también conocido como 4/0 AWG), por esfuerzo mecánico, esto aplica para toda conexión de tableros, estructuras metálicas, transformadores, carcasas metálicas de equipos, etc.

La tensión de toque, de paso y de malla tolerable dentro de la subestación es también la tolerable por el cuerpo humano y está dentro de lo permitido en el reglamento de CFE tanto para el sistema de red de tierra diseñada como la real teniendo pues una subestación segura para el personal que labora dentro de ella. Teniendo en cuenta que está diseñada para personas de mínimo 50 kg por lo tanto se debe de cuidar el acceso a dicha subestación y prohibirle el paso a las personas que no cumplan con este requisito.

La longitud de la red de tierra está directamente ligada al diseño de la empresa encargada tomando en cuenta la resistencia del terreno para realizar los cálculos de dicha subestación, por tal motivo varía esta distancia de la red de tierra diseñada con la real. En la real arroja como resultado 0.87Ω y en la diseñada 0.709Ω , de aquí pues que la longitud del conductor de la red sea mayor en la diseñada que en la real.

Esta resistencia la define el tipo de terreno donde se ubica la subestación, en este estudio se encuentra con un terreno muy rocoso por lo cual fue necesario rellenar esta subestación con arena arcillosa para que esta subestación se mantenga con la mayor humedad posible durante un mayor tiempo. No olvidando que la resistencia del terreno debe ser menor de 1 ohm para que el sistema de red de tierra tenga la capacidad de drenar mayor corriente de corto circuito y obtener un medio de baja impedancia.

Por seguridad del personal se implementa una capa superficial de mayor resistencia en este caso es grava (piedra de río) con una profundidad de 10 cm, esto sirve para aumentar la seguridad en la tensión de paso del personal que labora dentro de ella.

Para que la una subestación aumente la corriente que puede drenar es necesario que la resistencia del terreno sea menor de 1 ohm y proporcionar un medio de baja impedancia. La subestación angostura soporta una falla de 35.152 kA y de acuerdo a los cálculos del personal autorizado de CFE la subestación presenta

una corriente de corto circuito de fase a tierra de 17.487 kA, por lo tanto esta subestación está preparada para una falla dentro de ella.

Anexos.

Anexo 1 norma de cfe NRF-011-CFE-2004 (espacio de rejilla)

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 calculo 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.

Anexo 2. Nomenclaturas.

Símbolo	Descripción	Unidad
ρ	Resistividad del terreno	$\Omega - m$
ρ_s	Resistividad de la capa sobre la superficie del terreno	$\Omega - m$
ρ_1, ρ_2	Resistividad de la primera y segunda capa del terreno	$\Omega - m$
$3I_0$	Corriente de falla simétrica en la subestación	A
A	Área total ocupada por la red del sistema de tierra	m^2
C_s	Factor que relaciona el valor al nominal de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ	
d_r	Diámetro del conductor de la red	m
A_r	Área de la sección transversal del conductor de la red	mm^2
D	Separación entre conductores paralelos	m
D_f	Factor de decremento para determinar la corriente de falla asimétrica eficaz	
D_m	Distancia máxima entre dos puntos de la red	m
E_m	Tensión de malla en el centro de la malla de una de la red	V
$E_{step \text{ o } paso \ 70}$	Tensión de paso tolerable por un cuerpo humano de 70 Kg de peso	V
$E_{touch \text{ o } toque \ 70}$	Tensión de toque tolerable por un cuerpo humano de 70 Kg de peso	V
h	Profundidad de los conductores horizontales de la red del sistema de tierra	m
h_{c1}	Profundidad de la primera capa del terreno	m
h_s	Espesor de la capa de material de alta resistividad sobre la superficie	m
I_G	Corriente de tierra máxima que circula entre una red del sistema de tierras y el terreno que lo rodea	A
I_g	Corriente de tierra simétrica	A
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades	m
K_h	Factor que enfatiza los efectos de la profundidad de la red	

K_S	Factor de corrección para la geometría de la red	
K_{ii}	Factor de ajuste para los efectos de los interiores en la malla de una de las esquinas de la red	
K_m	Factor de espaciamento para la tensión de malla	
K_S	Factor de espaciamento para la tensión de paso	
L_C	Longitud total del conductor horizontal de la red del sistema de tierra	m
L_E	Longitud del electrodo bajo prueba (método de caída de tensión)	m
L_M	Longitud efectiva en función de L_C y L_R para determinar la tensión de malla	m
L_R	Longitud total de electrodos de tierra	m
L_r	Longitud de cada electrodo de tierra	m
L_S	Longitud efectiva en función de L_C y L_R para determinar la tensión de paso	m
L_T	Longitud efectiva total del conductor del sistema de tierra, incluyendo el de la red y los electrodos de tierra	m
L_x	Longitud máxima del conductor de la red en dirección del eje x	m
L_y	Longitud máxima del conductor de la red en dirección del eje y	m
n	Factor geométrico compuesto por los factores n_a , n_b , n_c y n_d	
n_R	Numero total de electrodos de tierra localizados dentro del área A	
R_g	Resistencia del sistema de tierra	Ω
r_E	Radio de la sección transversal del electrodo bajo prueba (método de caída de tensión)	m
t_f	Tiempo de liberación de la falla	seg



Bibliografía.

Manual de ingeniería eléctrica.
Tomo I y II
Decimotercera edición
Donald G. fink/ H. Wayne Beaty
Mc Graw Hill

Elementos de diseño de subestaciones eléctricas.
Segunda Edición
Enrique Harper
Limusa Noriega Editores

IEEE Standard 80-2000
Guid for Safety in AC Substation Grounding
New York

NMX-J-549-ANCE-2005.
Sistema de Proteccion Contra Tormentas Electricas.

Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas.
NRF-011-CFE-2004

Sistemas de Tierra de Sistemas Eléctricos.
Cuaderno Técnico
Comisión Federal de Electricidad
Julio 2005