

122
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"ILUMINACION E INSTALACIONES ELECTRICAS"
CARACTERISTICAS DE OPERACION DE UN
SISTEMA DE TIERRA PARA LA PROTECCION
DE UNA SUBESTACION DE 115 KV.

TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
RICARDO VALLEJO MOLINA

ASESOR: ING. PEDRO GUZMAN TINAJERO

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

264553



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

Facultad de Estudios
Superiores - Cuautitlan



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Q. MA. DEL CARMEN GARCIA MIJARES
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Iluminación e Instalaciones Eléctricas

"Características de Operación de un Sistema de Tierra para la
Protección de una Subestación de 115 Kv".

que presenta el pasante: Ricardo Vallejo Molina

con número de cuenta: 8937514-1 para obtener el Título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 18 de Junio de 19 98

MODULO:

PROFESOR:

FIRMA:

<u>I</u>	<u>Ing. Jaime Rodríguez Martínez</u>	<u></u>
<u>II</u>	<u>Ing. Pedro Guzmán Tinajero</u>	<u></u>
<u>IV</u>	<u>Ing. Benjamín Contreras Santa Cruz</u>	<u></u>

AA **gradecimientos**

AA **mi Mamá y a mi Papá:**

Un sincero agradecimiento por su apoyo, comprensión y desvelos.

Gracias por su paciencia y preocupación.

AA **mis Hermanos:**

Por el apoyo incondicional que recibí por parte de ellos en diferentes formas y porque sé que es una alegría para ellos.

AA **mis amigos:**

Principalmente Araceli Cutie y Raúl.

Por sus palabras de aliento y su confianza que me brindaron, además del tiempo y desvelos que me dedicaron para ver realizado este trabajo.

AA **mi mismo:**

Dedico éste trabajo, porque he saldado una cuenta que tenía conmigo.

*Sinceramente a todos: *Gracias.**

INDICE

1.- INTRODUCCION	1
2.- SUBESTACION	2
2.1 CAPACIDAD.	2
2.2 TENSION.	3
3.- CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TIERRA	3
3.1 CLASIFICACION DE LAS REDES DE TIERRA.	4
3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE TIERRA.	4
3.3 CONDUCTORES DE TIERRA Y PROTECCION.	6
3.4 DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA.	7
4.- FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRA	10
4.1 COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA.	10
5.- ANALISIS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO, MEDICIONES DE CAMPO Y SELECCION DEL MODELO DE SUELO	12
6.- TECNICAS DE MEDICION DE LA RESISTIVIDAD	15
7.- CORRIENTE MAXIMA DE MALLA Y ANALISIS DE FALLAS	19
7.1 TIPOS DE FALLA A TIERRA.	21
8.- RESISTENCIA A TIERRA	24
9.- CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR	25
10.- CALCULO DE POTENCIAS DE MALLA	28
10.1 POTENCIAL DE PASO.	30
10.2 LONGITUD MINIMA DE CONDUCTORES EN LA MALLA.	31
11.- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	32
12.- CASO PRACTICO	35
CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFIA	49

OBJETIVOS:

Conocer los potenciales de contacto y paso en la red de tierras de la subestación para que no excedan los valores límites de los potenciales tolerables por el cuerpo humano. Establecer un diseño de la resistencia a tierra cumpliendo los valores recomendados por las normas.

I.- INTRODUCCION:

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

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

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

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

2.- SUBESTACION ELECTRICA

Es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia, sus funciones principales son: transformar tensiones y derivar circuitos de potencia.

Según su función, las subestaciones eléctricas se clasifican en:

-Elevadoras:

Son las que interconectan a las plantas generadoras con líneas de transmisión y llevan a cabo una elevación de tensión para hacer posible la transmisión de energía a grandes distancias.

-De interconexión:

Tiene como finalidad interconectar diferentes líneas de transmisión directamente, si son de la misma tensión, o mediante transformadores si son de tensión diferente.

-Reductoras de subtransmisión:

Lleva a cabo una reducción de la tensión a un valor adecuado para su distribución y pueden ser alimentadas por la red de transmisión de alta tensión o a través del sistema de subtransmisión.

De acuerdo con la potencia y tensión que manejan las subestaciones, estas se pueden agrupar en:

- Subestaciones de transmisión: arriba de 230 Kv.
- Subestaciones de subtransmisión: entre 230 y 115 Kv.
- Subestaciones de distribución primaria: entre 115 y 23 Kv.
- Subestaciones de distribución secundaria: abajo de 23Kv.

2.1 CAPACIDAD

Se fija considerando la demanda actual de la zona en KVA más el incremento en el crecimiento obtenido por extrapolación durante los siguientes diez años, previendo el espacio necesario para las futuras ampliaciones.

2.2 TENSION

Dentro de la gama existente de tensiones normalizadas, la tensión de una subestación se puede fijar en función de los factores siguientes:

- a) Si la subestación es alimentada en forma radial, la tensión se puede fijar en función de la potencia de la misma.
- b) Si la alimentación proviene de un anillo, la tensión queda obligada por la misma del anillo.
- c) Si la alimentación se toma de una línea de transmisión cercana, la tensión de la subestación queda obligada por la tensión de la línea citada.

3.- CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TIERRA

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

-Resistencia a la corrosión, para retardar su deterioro en el ambiente donde se localice.

-Conductividad eléctrica, de tal manera que no contribuya sustancialmente con diferencias de potencial en el sistema de tierra.

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

-Resistencia mecánica, de tal manera que soporte esfuerzos electromecánicos y daño físico.

En general se establece que en ningún punto de una instalación eléctrica se deben presentar tensiones de paso o de contacto superiores a los siguientes valores:

-60 volts, cuando no se marca la eliminación rápida de una falla de línea a tierra.

-720 volts, cuando la falla se elimine en un período de un segundo.

-Si se supone que la resistencia del cuerpo humano es de 3000 ohms, las corrientes en cada caso son de 20mA y 40mA respectivamente.

3.1 CLASIFICACION DE LAS REDES DE TIERRA

-Puesta a tierra para protección:

Es necesario conectar eléctricamente al suelo todas aquellas partes de las instalaciones eléctricas que no se encuentran sujetas a tensión normalmente, pero que pueden tener diferencias de potencial a causa de fallas accidentales, que pueden ser: los tableros eléctricos, el tanque de los transformadores e interruptores, la carcasa de las máquinas eléctricas, la estructura metálica de las subestaciones o las líneas de transmisión y en todos los soportes metálicos de equipos y aparatos.

-Puesta a tierra para funcionamiento:

-Estos puntos del sistema por conectar a tierra pueden ser, la conexión a tierra de los neutros de los alternadores, los transformadores, en los devanados conectados en estrella, la conexión a tierra de los apañarrayos de los hilos de guarda de los transformadores de potencial y algunos otros.

-Puesta a tierra para trabajo:

-Es necesario realizar conexión a tierra temporales con partes de la instalación puestas fuera de servicio con el fin de que sean accesibles sin peligro para los trabajos a realizar.

3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE TIERRA

Consiste en el cálculo de un conjunto de elementos dispersores convenientemente conectados de manera que se tenga una resistencia de tierra resultante.

$$R_t = \frac{V_t}{I_t}$$

siendo V_t la máxima tensión admisible a tierra y que corresponde a la máxima corriente de tierra I_t .

La resistencia a tierra de un dispersor sencillo depende de su forma y dimensiones del valor medio de la resistividad del terreno que a su vez depende de la naturaleza del terreno, del grado de humedad y de la temperatura.

Terreno húmedo o suelo orgánico	10-50-	ohms-metro
Terreno de cultivo arcilloso	100-	ohms-metro
Tierra arenosa húmeda	200-	ohms-metro
Tierra arenosa seca	1000-	ohms-metro
Tierra y con guijarros de cemento	1000-	ohms-metro
Suelo rocoso	3000-	ohms-metro
Roca compacta	10000-	ohms-metro

Los elementos que afectan la variación en la resistividad del terreno son:

-Temperatura:

Determina ciertas variaciones en la resistividad del terreno, para evitar este inconveniente es recomendable que los dispersores se entierren a una cierta profundidad de manera que no se manifieste la acción del hielo.

-Humedad:

Para profundidades mayores de 3.0 mts. Los dispersores pueden considerarse solo sujetos al efecto de humedad.

En la práctica para obtener una resistencia de tierra son:

a) Dispersor cilíndrico o varilla tubular de radio r enterrado vertical en el suelo con una longitud L .

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$$

b) Dos tubos enterrados a una distancia S uno del otro:

Sí $S < L$

$$R_t = \frac{\rho}{4\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{r} \right)^2 - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \right]$$

Sí $S > L$

$$R_t = \frac{\rho}{4\pi L} \left[\ln \frac{4L}{r} - 1 + \frac{L}{S} - \frac{L^3}{3S^3} + \frac{2L^5}{5S^5} \right]$$

c) Conductor o anillo de radio dispuesto en anillo de diámetro D enterrado horizontalmente a la profundidad S/12.

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{16D^2}{r_a} \right)$$

La forma típica de los dispersores que se usan más conveniente.

d) Placa rectangular de ancho A, espesor B 1/8 A y longitud 2L enterrada en forma horizontal a una profundidad S/2.

$$R_i = \frac{\rho}{4\pi L} \left[\ln \frac{16L^2}{A_s} + \frac{A^2 - AB}{3(A+B)^2} - 1 + \frac{S}{2-L} - \frac{S^2}{16^2} + \frac{S^4}{512^4} \right]$$

3.3 CONDUCTORES DE TIERRA Y DE PROTECCION

Las normas internacionales dan ciertas recomendaciones para la selección del material de los conductores de tierra de la sección y de la puesta en operación.

Los materiales deben de ser metálicos de suficiente conductividad, resistencia mecánica e idóneo para el medio ambiente.

Para la conexión a tierra de los apartarrayos no se deben usar como conductores de tierra alambres o cables de acero, debido a que aumenta el efecto inductivo.

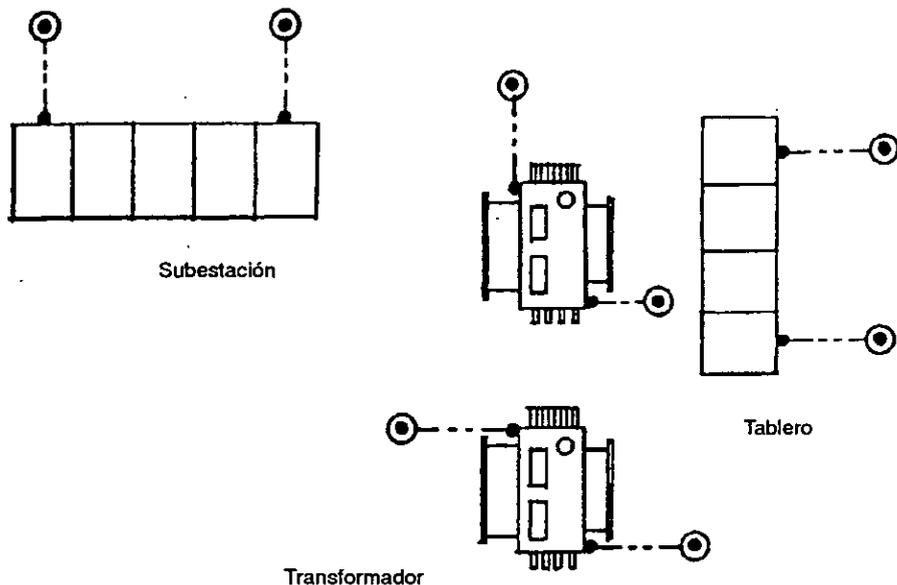
Se prohíbe usar como conductores de tierra elementos de transmisión de cualquier género, así como partes metálicas que pueden ser usadas para trabajos eventuales.

3.4 DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA

Se han considerado básicamente tres sistemas:

- Sistema radial:

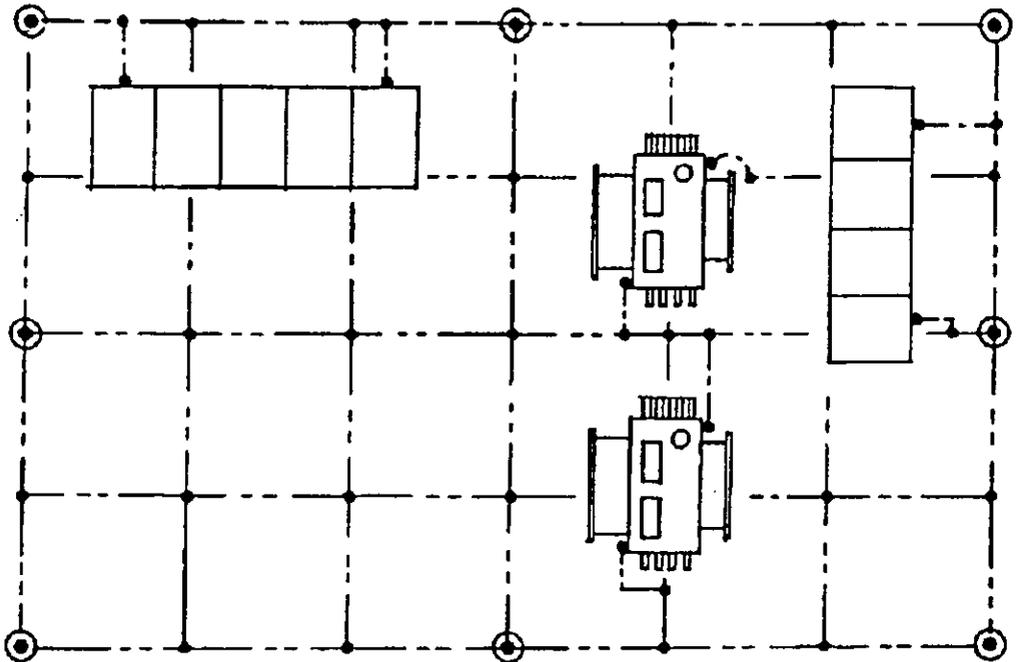
Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra a los cuales se conecta la derivación de cada uno de los equipos. El sistema radial es el menos seguro, ya que al producirse una falla en el equipo, se producen elevados gradientes de potencial.



- CONDUCTOR DE TIERRA
- ⊙ VARILLA DE TIERRA
- CONECTOR

Sistema de malla:

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



- CONDUCTOR DE TIERRA
- ⊙ VARILLA DE TIERRA
- CONECTOR

4. FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRA

-Proveer un medio seguro para proteger al personal en la proximidad de sistemas o equipos conectados a tierra, de los peligros de una descarga eléctrica bajo condiciones de falla.

-Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas a tierra, sin que se excedan los límites de operación de los equipos.

-Proveer una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran (transformadores, reactores, etc.).

-Proveer un medio de descarga y desenergización de equipos antes de proceder a tareas de mantenimiento.

-Facilitar mediante la operación de relevadores y otros dispositivos de protección, la eliminación de fallas a tierra en el sistema.

4.1 COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA

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

Conductores:

Sirven para formar el sistema de tierra y para la conexión a tierra de los equipos. Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre, cobre estañado, copperweld (acero recubierto con cobre), acero, acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio. El factor principal en la selección del material es la característica de corrosión que se presenta al estar enterrado. El cobre es la selección más común para los conductores, ya que es económico y tiene buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión y a la fusión. El calibre de los conductores se determinará por requerimientos de conducción de corriente.

Varillas o electrodos de tierra:

Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo. Los materiales empleados en la fabricación de varillas o electrodos de tierra son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld.

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

-Conectores o juntas:

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

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

a) Los conectores a presión: Son todos aquellos que mediante presión mantienen en contacto a los conductores:

En este tipo este tipo están comprendidos:

1.- Los conectores atornillados: Son aquellos que se fabrican formando dos piezas que se unen por medio de tornillos. El material del conector es de bronce con alto contenido de cobre y el de los tornillos es de bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión.

2. Los conectores de compresión: se fabrican en una sola pieza y mediante herramientas especiales se colocan para la unión de conductores. Los conectores a presión deberán diseñarse para una temperatura máxima de 250 a 350 grados centígrados.

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

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

1. Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce al circular por él corrientes elevadas. (Resistente a la fusión).

2. Tener suficientemente asegurados a los conductores para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por las fallas, además de no permitir que el conductor se mueva dentro de él.

5. ANALISIS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO, MEDICIONES DE CAMPO Y SELECCION DEL MODELO DEL SUELO.

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

-Resistividad del terreno:

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

De la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Despejando a ρ :

$$\rho = \frac{RA}{L} = \text{ohms} \frac{\text{Long} \times \text{Long}}{\text{Long}} = \text{ohms} \times \text{Long}$$

En el sistema métrico:

ρ = Resistividad del terreno en Ohms-metro

R = Resistencia en Ohms

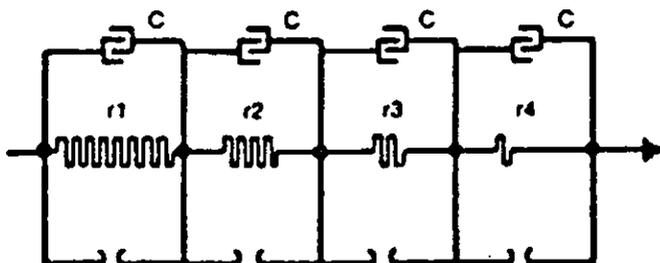
A = Area de la sección transversal en m²

L = Longitud en m.

La resistividad del terreno para el diseño de una red de tierras, generalmente se determina por una interpretación apropiada de los datos de campo. Debido a que la resistividad del terreno varía tanto horizontal como verticalmente, los datos se conocen como perfil de resistividad aparente del suelo, los cuales se obtienen por pruebas en varios lugares de la subestación y hasta en cierta profundidad en el terreno. Un modelo de suelo, con sus parámetros a usarse en el diseño, puede determinarse por simples técnicas o por ser los métodos más sofisticados de computadora.

-Características del suelo:

El comportamiento de una varilla o electrodo de tierra enterrado en el suelo, puede analizarse por medio del siguiente circuito:



Como se puede observar, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de resistencia r y como un dieléctrico excepto para ondas de alta frecuencia y frente con mucha pendiente penetrando un suelo de material muy resistivo, la corriente de carga es despreciable en comparación con la corriente de fuga y la tierra puede representarse por una resistencia pura.

-Efecto del gradiente de voltaje:

La resistividad del suelo no se afecta por el gradiente de voltaje a menos que éste exceda un cierto valor crítico. El valor algunas veces varía con el tipo de material del suelo, generalmente tiene una magnitud de varios kilovolts por centímetro.

Una vez excedido, se desarrollará un arco en la superficie del electrodo que avanzará hasta tierra a fin de incrementar el tamaño efectivo del electrodo, hasta que los gradientes son reducidos a valores que el material del suelo pueda soportar. Debido a que el sistema de tierras de la subestación se diseña para cumplir con criterios más rigurosos de límites de voltajes de paso y de contacto, el gradiente puede suponerse que está por debajo del valor crítico.

-Efecto de la magnitud de corriente:

La resistividad del suelo en la vecindad de una varilla o electrodo de tierra puede afectarse por las corrientes que fluyen de los electrodos hacia el terreno que la rodea.

Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo, determinarán si la corriente de una magnitud y una duración dada, provocará que el terreno pierda humedad y entonces incremente su resistividad.

Un valor conservador de densidad de corriente no debe exceder de 200 A/m² en un segundo.

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

La resistividad del suelo se incrementa considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce al menos del 15% del peso de éste. La cantidad de agua en el suelo depende del tamaño de las partículas y de su compactación. Sin embargo como se muestra en la figura 1 curva 2, la resistividad se afecta muy poco una vez que el contenido de humedad excede el 22%.

La curva 3 de la figura 1, muestra la variación típica de la resistividad del suelo con respecto a la temperatura para un terreno arcilloso que contenga 15.2% de humedad por peso.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo, puede considerarse despreciable para temperaturas arriba del punto de congelación. A 0°C el agua en el suelo se empieza a congelar y la resistividad se incrementa rápidamente. La composición y la cantidad de sales solubles, ácidos o alkalis presentes en el suelo, pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva 1 de la figura 1, ilustra el efecto típico de la sal común (cloruro de sodio), sobre la resistividad del suelo al contener 30% de humedad por peso.

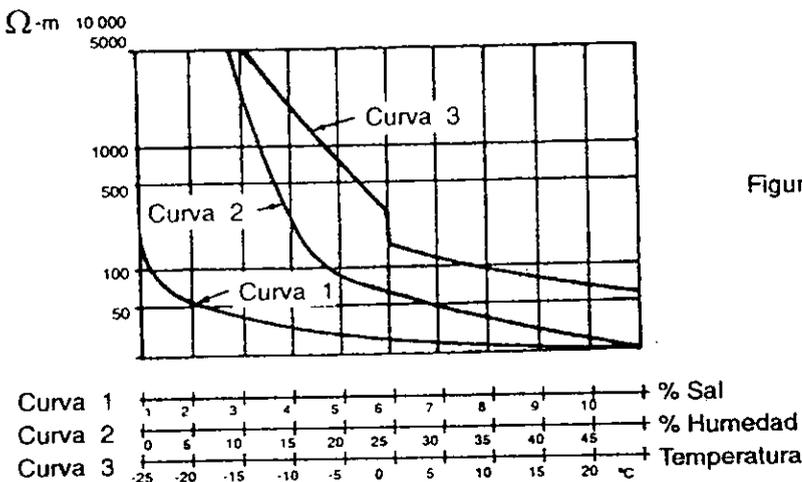


Figura 1

6. TECNICAS DE MEDICION DE LA RESISTIVIDAD.

La investigación en campo del lugar en que se va a ubicar una subestación, es esencial para determinar la composición general del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca de su homogeneidad.

Las muestras de campo para los estudios de Mecánica de Suelos son muy útiles, ya que proporcionan información sobre las diferentes capas del subsuelo y los materiales que los componen, dando una idea de su resistividad.

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

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

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

a) Método de 4 puntos o método de Wenner:

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

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

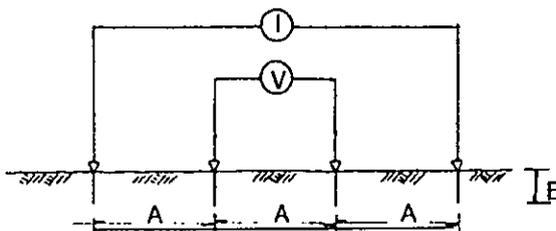
Se hace circular una corriente de prueba I entre los dos electrodos exteriores y se mide con un volmetro de alta impedancia, la tensión entre los electrodos interiores.

La relación V/I nos dará el valor de resistencia R en Ohms.

Existen 2 variaciones en este método:

-Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner:

Con este arreglo, los electros están igualmente espaciados mo se muestra en la figura 2a:



$$B = 0.1A$$

Figura 2a

Si "A" es la distancia entre dos electrodos adyacentes, la resistividad, en terminos de la unidad de longitud en que "A" y "B" se miden, será:

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

Si "A" y "B" se miden en cm. o en mts. y la resistencia en ohms, la resistividad estará dada en ohms.cm o en ohms.m, respectivamente. Si la longitud "B" es mucho menor que la longitud "A", puede suponerse B=0 y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR$$

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

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función a su espaciamento, indicandose en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

-Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Shlumberger Palmer:

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los electrodo interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes.

Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede usarse el arreglo mostrado en la figura 2b:

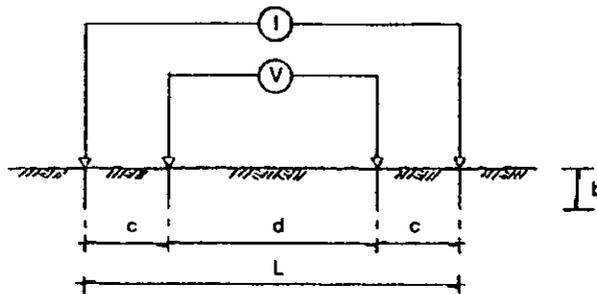


Figura 2b

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

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

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

Además, con valores grandes de d/L, las variaciones de los valores medidos, debidas a irregularidades en la superficie, se reduce dando mediciones más precisas.

b) Método de tres puntos o caídas de potencial:

El diagrama de conexiones para este método se muestra en la figura 3:

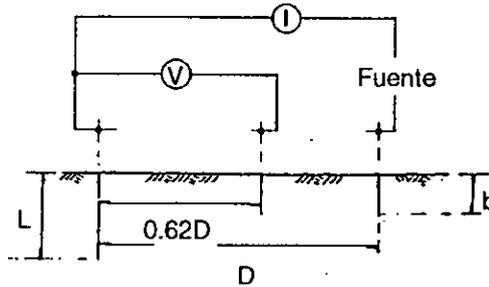


Figura 3

En este método, la profundidad L de la varilla de prueba es variable. Las otras dos varillas, conocidas como varillas de referencia, se entierran a una profundidad "b" y en línea recta con la varilla de prueba.

La varilla de referencia de tensión deberá localizarse a 62% de la distancia entre la varilla de referencia de corriente y la varilla de prueba.

Para minimizar la interferencia inter-electrodos, la varilla de referencia de corriente deberá localizarse al menos a una distancia 5L de la varilla de prueba.

Estas especificaciones para la localización de las varillas de referencia, están basadas en la suposición de un suelo uniforme.

-Resistencia a tierra de una varilla.

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

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

Para cada longitud L de la varilla, la resistencia R medida, determina el valor de resistividad aparente. Cuando este valor se gráfica contra L, se observan las variaciones de la resistividad del terreno con la profundidad.

7. CORRIENTE MAXIMA DE MALLA Y ANALISIS DE FALLAS

Determinación de la corriente máxima de la malla:

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

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

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

-Para cada uno de los tipos de falla y basado en su tiempo de duración t_f , se determina el valor del factor de decremento D_f para los efectos de asimetría de la onda de corriente de falla.

-Seleccionar el valor más grande del producto $D_f \cdot I_g$ y por lo tanto la peor condición de falla, y establecer el valor del factor de proyección para obtener los márgenes para el crecimiento futuro del sistema.

Corriente simétrica de malla:

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

$$I_g = S_f I_f$$

donde:

I_g = Corriente simétrica de malla en Amperes.

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

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

Corriente máxima de malla:

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

$$I_G = C_p D_t I_g$$

donde:

I_G = Corriente máxima de malla en Amperes.

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

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

I_g = Corriente simétrica de malla (valor rms) en amperes.

Efecto de la Asimetría. Factor de decremento:

La máxima corriente de malla I_G , es la máxima corriente asimétrica que fluye entre la malla de tierras y el terreno que la rodea.

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

Ya que el diseño de la red de tierra debe considerar la corriente asimétrica, debemos encontrar un factor llamado de decremento D_t , el cual tomará en cuenta el efecto de desplazamiento de la componente de cd.:

$$D_t = \sqrt{1 - \frac{I_a}{I_g} \left[1 - e^{-2t_f / T_a} \right]}$$

donde:

t_f = Duración de la falla en segundos

Factor de división de la corriente de falla:

Se define como:

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

donde:

I_g = Corriente simétrica de malla.

I_o = Corriente de secuencia cero en el punto de falla.

7.1 TIPOS DE FALLA A TIERRA

Pueden ocurrir diferentes tipos de falla en el sistema, pero es difícil determinar que tipo de falla y su localización, proporcionarán el mayor flujo de corriente entre la malla de tierras y el terreno que la rodea. Figuras 4,5,6,7.

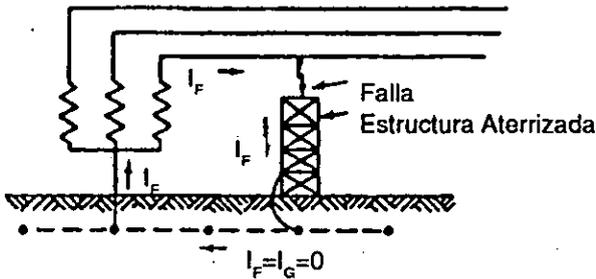


Figura 4
Falla local en la subestación
Neutro aterrizado localmente

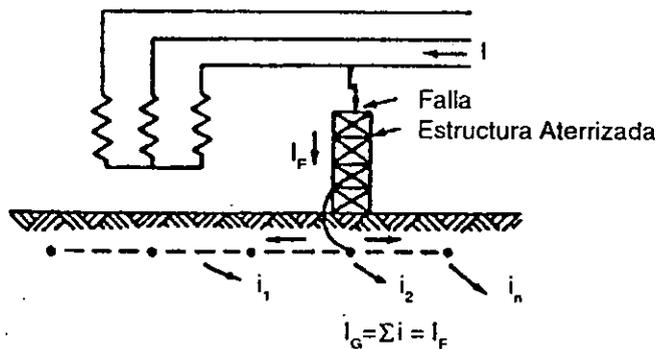


Figura 5
 Falla local en la Subestación
 Neutro aterrizado remotamente

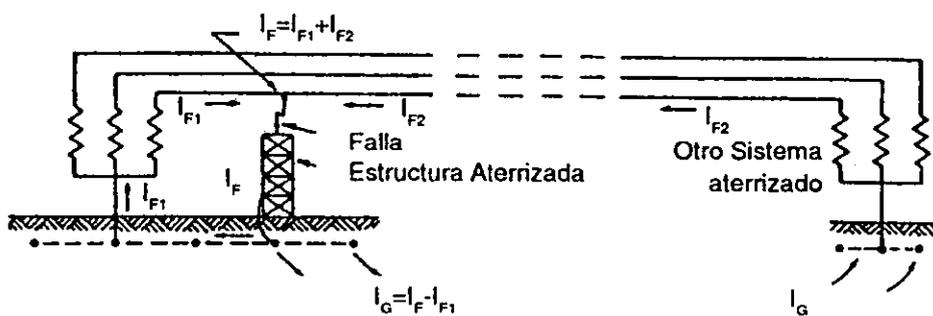


Figura 6
 Falla local en la Subestación,
 Sistema aterrizado localmente y en otros puntos

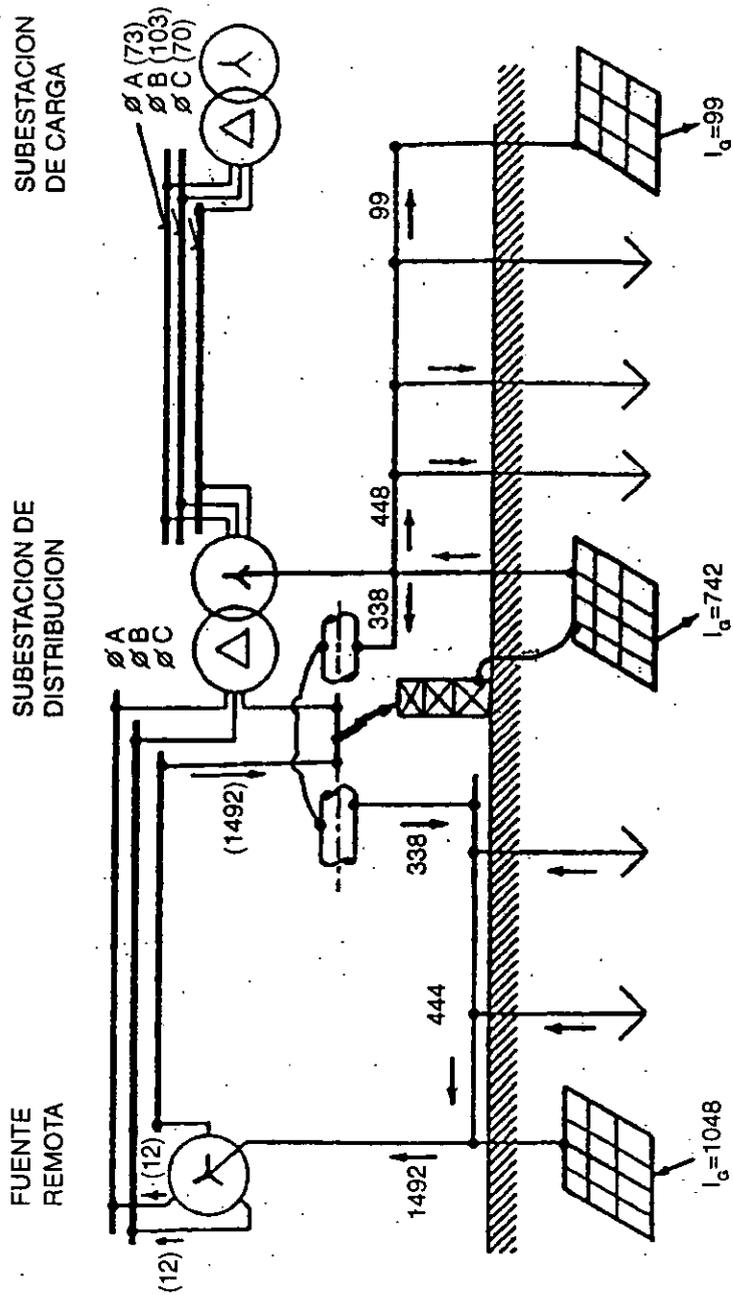


Figura 7
 División de corrientes para una falla en el lado de alta tensión de una Subestación de Distribución

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

Las fórmulas para calcularse son:

Falla monofásica	Falla bifásica a tierra
$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0}$	$I_0 = \frac{EX_2}{X_1(X_0 + X_2) + X_2X_0}$

donde:

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

E = Voltaje en el punto de falla

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

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

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

8. RESISTENCIA A TIERRA

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

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

9. CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR

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

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

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

donde:

- I = Corriente rms en Kiloamperes
- A = Sección transversal del conductor en mm²
- T_m = Temperatura máxima permisible en grados centígrados
- T_a = Temperatura ambiente en grados centígrados
- T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en grados centígrados
- α₀ = Coeficiente térmico de resistividad a cero grados centígrados
- α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r
- ρ_r = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia T_r en ohms.cm
- K₀ = 1/α₀ ó (1/α_r)-T_r
- t_c = Tiempo de duración del flujo de corriente en segundos
- TCAP = Factor de capacidad térmica en J/cm³/°C

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

Description	Material Conductivity (%)	α_r Factor @ 20 °C	K_0 ($1/\sigma_0$) @ 0 °C	Fusing Temperature (°C)	ρ_r @ 20 °C ($\mu\Omega\text{-cm}$)	TCAP Factor Effective Value ($J/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1084/ 1300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1084/ 1300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.656
Aluminum Alloy Wire 6005	63.6	0.00415	213	660	3.2220	2.698
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.698
Aluminum-Clad Steel Core Wire	20.3	0.00360	258	660/ 1300	8.4805	2.670
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.00320	293	419/ 1300	20.1	3.931
Stainless Steel No 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Tabla 1
Constantes de Materiales

Si el tamaño del conductor esta dado en circular Mills, la ecuación se modifica a:

$$I = 5.0671 \times 10^{-6} A \sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}$$

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

La figura 8 y la tabla 2, proporcionan una referencia rápida para algunos materiales, suponiendo los siguientes parámetros de diseño:

- Temperatura ambiente de 40°C
- Temperatura límite de fusión del conductor como se muestra en la tabla 1.
- Temperatura máxima de 450 y 250°C para los conectores.

Fault Time (s)	100% Cu Only	97% Cu Only	40% CCS Only	30% CCS Only	97% Cu/Temperature Limits (450 °C)	97% Cu/Temperature Limits (250 °C)
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	18.7	23.5
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3

Tabla 2
Tamaño mínimo de conductor (cmils/A)

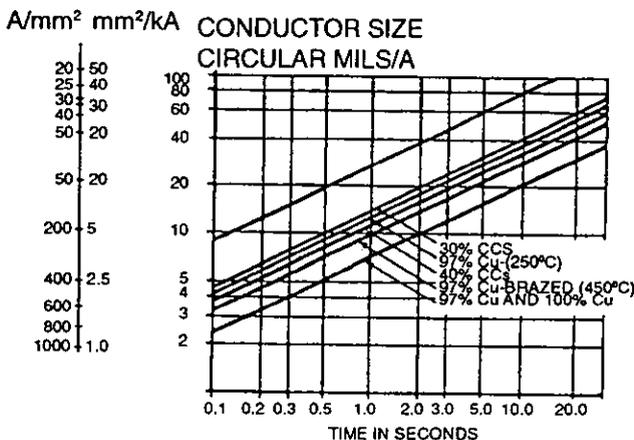


Figura 8
Nomograma para cálculo de conductores

10. CALCULO DE POTENCIAS DE MALLA

Potencial de contacto:

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_m = \rho K_m K_i I_g / L$$

Es el producto del factor geométrico K_m , El factor de corrección K_i , la resistividad del terreno y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud del conductor enterrado I_g / L :

Cálculo del factor K_m :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{k_a}{k_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

donde:

$K_{ii} = 1$ para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro o con varillas en las esquinas de la malla o con varillas a lo largo del perímetro y toda la malla.

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

Para mallas sin varillas de tierra o mallas que contengan solo algunas varillas, ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro.

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

h = Profundidad de la malla en metros

$h_0 = 1$ metro (profundidad de referencia de la malla)

D, n y d se definen en la tabla No. 3

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

Tabla 3
Calibre y Diámetro de Conductores.

Cálculo del factor K_i

$$K_i = 0.656 + 0.172 n$$

Cálculo de la longitud L :

Para mallas con varillas de tierra:

$$L = L_c + 1.15 L_r$$

donde:

L_c = Longitud de conductores enterrados en la malla

L_r = Longitud total de las varillas de tierra.

El factor 1.15 refleja el hecho de que la densidad de corriente es mucho mayor en las varillas cerca del perímetro que en los conductores de la malla.

Para mallas de varillas de tierra, o mallas con varillas pero localizadas lejos del perímetro:

$$L = L_c + L_r$$

10.1 POTENCIAL DE PASO

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_s = \rho k_s k_i I_g / L$$

Es el producto del factor geométrico K_s , El factor de corrección K_i , La resistividad del terreno y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I_g/L

Cálculo del factor K_s :

Para una profundidad $0.25m < h < 2.5m$

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

Para una profundidad menor de 0.25m:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} w \right]$$

El empleo de las diferentes ecuaciones para el factor K_s , depende de la profundidad h de la malla, ya que el potencial de paso decrece rápidamente cuando se incrementa la profundidad.

10.2 LONGITUD MINIMA DE CONDUCTORES EN LA MALLA

Puede desarrollarse una ecuación que permita determinar de manera preliminar, la longitud de conductor necesaria en la malla para mantener el potencial de contacto dentro de límites seguros.

Para $E_m < E_{Cont50}$

$$\frac{K_m K_i \rho}{L} < (1000 + 1.5 C_s(h_s, k) \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

Ordenando la ecuación:

$$L < \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_s}}{(116 + 0.174 C_s(h_s, k) \rho_s)}$$

Y Para $E_m < E_{Cont70}$

$$L < \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_s}}{(157 + 0.235 C_s(h_s, k) \rho_s)}$$

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El diagrama de bloques de la figura 9, ilustra la secuencia para diseñar una malla de tierra.

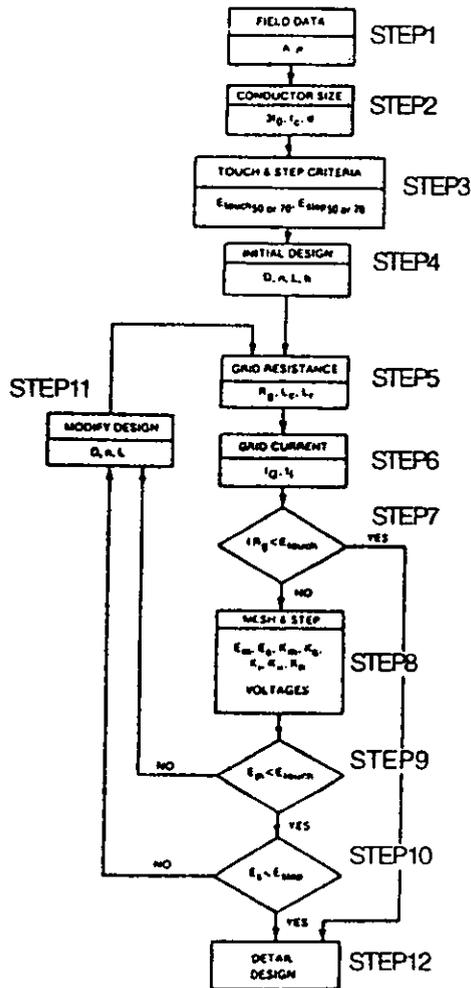


Figura 9
Diagrama de bloques

Paso 1. Datos de Campo:

Area ocupada por la malla de tierras y resistividad del terreno. El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general de arreglo de equipos de la subestación. En este plano estarán indicados los límites y la ubicación de los equipos.

La resistividad del terreno podrá determinarse con algunos de los métodos anteriores o de datos promedio proporcionados por tablas. Las pruebas de resistividad determinarán el perfil de resistividad y modelo del suelo a utilizar (uniforme o de dos capas).

Paso 2. Dimensionamiento del Conductor:

Cálculo de la corriente de falla. Tiempo de duración de la falla y diámetro del conductor de la malla.

La corriente de falla podrá calcularse con las fórmulas anteriores y será la máxima que los conductores puedan conducir en la malla de tierras. El tiempo de duración de la falla reflejará el tiempo máximo posible para la liberación de la falla, incluido el de operación de una protección de respaldo.

Paso 3. Diseño inicial de la malla:

El diseño preliminar de la malla se deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación.

Se localizarán conductores cruzados en dos direcciones formando una retícula para permitir la conexión a tierra de los diferentes equipos.

El espaciamiento entre estos conductores y la localización de las varillas de tierra, deberá basarse en la corriente I_g y en el área a proteger por la malla.

Paso 4. Corriente de malla:

La corriente I_g se determina por las ecuaciones citadas anteriormente. Para evitar un sobredimensionamiento de la malla, se usará en el diseño, únicamente aquella parte de la corriente total de falla $3I_g$ que fluye de la malla hacia el terreno y que contribuye a los potenciales de paso y de malla y a la elevación de potencial de la malla.

La corriente I_g deberá reflejar la peor condición de falla (tipo y localización), el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema eléctrico.

Paso 5. Comparación de potenciales:

Si la máxima elevación de potencial de la malla de diseño preliminar esta por debajo del valor de potencial de contacto tolerable, ya no es necesario realizar más cálculos, únicamente se agregarán si se requieren conductores adicionales para puesta a tierra de equipos.

Paso 6.

Si los potenciales de paso y de contacto en la malla son menores a los potenciales tolerables, el diseño necesitará solamente de conductores adicionales para puesta a tierra de equipos, si no, tendrá que revisarse el diseño preliminar.

12. CASO PRACTICO

PROCEDIMIENTO:

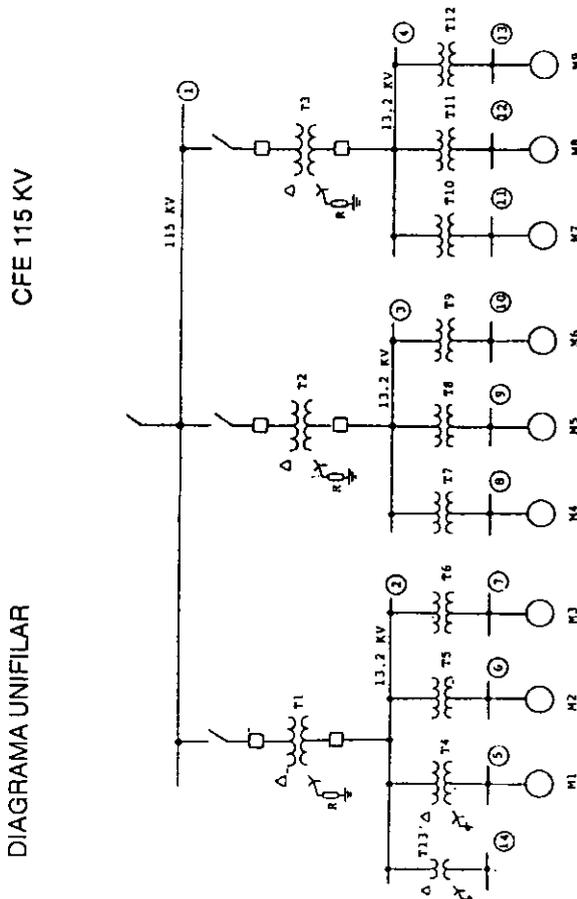
Se obtendrán los valores de potencia o corriente de corto circuito, a partir de la reactancia equivalente de Thevenin en cada punto de falla utilizando valores en por unidad.

Se considerará para los motores una carga agrupada, con reactancia subtransitoria igual a 25% (0.25 p.u).

No hay contribución de corrientes al punto de falla de las cargas de alumbrado.

No se considerará la reactancia de los cables alimentadores.

DATOS DE DIAGRAMA UNIFILAR



DATOS DE CFE PARA LA ACOMETIDA DE 115 Kv.

Potencia de corto-circuito Trifásico:

1626 MVA

Potencia de corto-circuito Monofásico:

1296 MVA

Transformadores T1, T2 y T3:

5MVA, 115-13.2/7.62 KV, Z=6%

Resistencia del neutro:

R=12.7 Ohms

Transformadores T4 a T12:

1000KVA, 13200-440/254 V, z=4.6%

Transformador T13:

75 KVA, 13200-220/127 V, z=3%

Grupo de motores M1 a M9:

1000 KVA, 440 V, X=25%

VALORES POR UNIDAD REFERIDOS A UNA BASE DE 5 MVA

Los valores de voltaje nominal en los buses se considerarán voltajes base.

Reactancias de SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA:

$$X = \frac{5}{1626} = 0.003075 \text{ pu}$$

Transformador 5 MVA:

$$X = 0.06 \text{ pu}$$

Transformador 1MVA:

$$X = 0.046 \left(\frac{5}{1}\right) = 0.23 \text{ pu}$$

Carga 1 MVA:

$$X = 0.25 \left(\frac{5}{1} \right) = 1.25 \text{ pu}$$

Transformadores 75 KVA:

$$X = 0.03 \left(\frac{5}{0.075} \right) = 2.00 \text{ pu}$$

Reactancias de Secuencia Cero:

$$I_a = I_{cc} = \frac{1296000}{\sqrt{3} \times 115} = 6506.43 \text{ Amp}$$

$$I_{\text{base}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 115} = 25.102 \text{ Amp}$$

$$I_{\text{pu}} = \frac{6506.43}{25.102} = 86.4 \text{ pu}$$

$$I_{a0} = \frac{259.2}{3} = 86.4 \text{ pu}$$

De la ecuación:

$$I_{a0} = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

Despejando X_0 :

$$X_0 = \frac{E}{I_{a0}} - 2X_1 = \frac{1}{86.4} - 2(0.003075) = 0.00542 \text{ pu}$$

Transformador 5 MVA:

$$X_0 = X_1 = X_2 = 0.06 \text{ pu}$$

Resistencia del neutro:

$$R_n = 12.7 \text{ Ohms}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{13.2^2}{5} = 34.848 \text{ Ohms}$$

$$R_n = \frac{12.7}{34.848} = 0.36444 \text{ pu}$$

$$3R_n = 1.09332 \text{ pu}$$

Transformador 75 KVA:

$$X_0 = X_1 = X_2 = 2.00 \text{ pu}$$

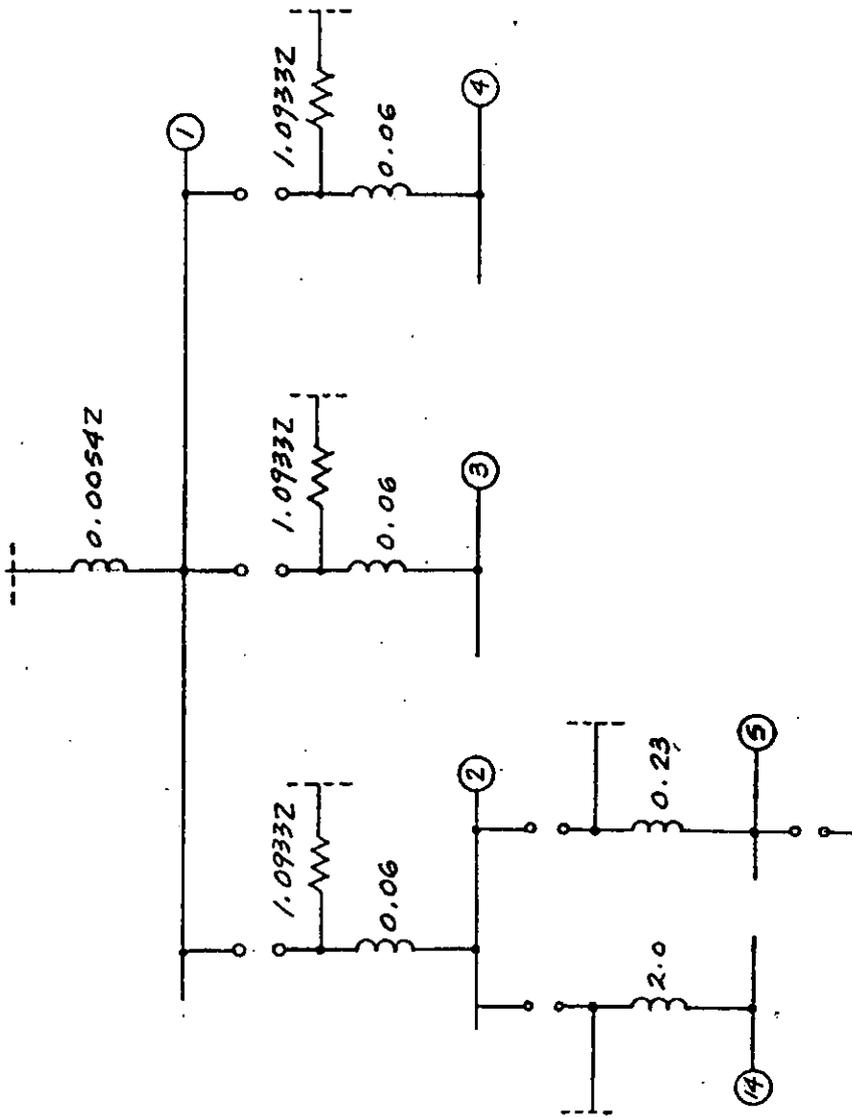


DIAGRAMA DE REACTANCIAS
SECUENCIA CERO

CALCULO DE CORTO CIRCUITO TRIFASICO

Del diagrama de Reactancias de Secuencia Positiva:

X equiv en Bus 1 :

$$X_1 = 0.00302 \text{ pu}$$

$$P_{cc} = \frac{1}{0.00302} \times 5 = 1655.76 \text{ MVA}$$

X equiv en Bus 2,3 y 4 :

$$X_1 = 0.055898 \text{ pu}$$

$$P_{cc} = \frac{1}{0.055898} \times 5 = 89.44 \text{ MVA}$$

X equiv en Bus 5 :

$$X_1 = 0.234130 \text{ pu}$$

$$I_{cc} = \frac{1}{0.234130} = 4.27110 \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 0.44} = 6560.79 \text{ Amp}$$

$$I_{cc} = 4.27110 \times 6560.79 = 28022.03 \text{ Amp}$$

X equiv en Bus 14:

$$X_1 = 2.055898 \text{ pu}$$

$$I_{cc} = \frac{1}{2.055898} = 0.486405 \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 0.22} = 13121.59 \text{ Amp}$$

$$I_{cc} = 0.486405 \times 13121.59 = 6382.4 \text{ Am,p}$$

CALCULO DE CORTO CIRCUITO MONOFASICO:

Del diagrama de Reactancias de Secuencia Cero:

X equiv en el Bus 1 :

$$X_0 = 0.005420 \text{ pu}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2 \times 0.00302) + 0.005420} = 87.26 \text{ pu}$$

$$I_a = 3I_{a0} = 261.78 \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 115} = 25.102 \text{ Amp}$$

$$I_a = 261.78 \times 25.102 = 6571.25 \text{ Amp}$$

Z equiv en Bus 2,3 y 4:

$$Z_0 = 1.09332 + j 0.06 \text{ pu}$$

$$Z_0 = 1.094965 \angle 3.14^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{2(0.055898 \angle 90^\circ) + 1.094965 \angle 3.14^\circ} = 0.903577 \angle -8.929^\circ \text{ pu}$$

$$I_a = 3I_{a0} = 2.710731 \angle -8.929^\circ \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 13.2} = 218.69 \text{ Amp}$$

$$I_a = 2.710731 \times 218.69 = 592.80 \text{ Amp}$$

X equiv en Bus 5:

$$X_0 = 0.23 \text{ pu}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2 \times 0.234130) + 0.23} = 1.432131 \text{ pu}$$

$$I_a = 3I_{a0} = 4.296394 \text{ pu}$$

$$I_{base} = 6560.79 \text{ Amp}$$

$$I_a = 4.296394 \times 6560.79 = 28187.73 \text{ Amp}$$

X equiv en Bus 14:

$$X_0 = 2.0 \text{ pu}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2 \times 2.055898) + 2.0} = 0.16362 \text{ pu}$$

$$I_a = 3I_{a0} = 0.49085 \text{ pu}$$

$$I_{base} = 13121.59 \text{ Amp}$$

$$I_a = 0.49085 \times 13121.59 = 6440.78 \text{ Amp}$$

MEMORIA DE CALCULO DE RED DE TIERRAS PARA SUBESTACION PRINCIPAL DE 115V

DATOS PARA EL CALCULO:

Corriente de falla monofásica	I= 6571.25 Amp
Corriente de diseño	I= 6600 Amp
Longitud de la subestación	50 mts.
Ancho de la subestación	37 mts.
Resistividad del terreno	$\rho = 200$ Ohms.mts
Resistividad superficial (grava en la superficie)	$\rho_s = 3000$ Ohms.mts
Profundidad de la red	h= 0.6 mts
Espesor de la capa de grava	hs= 0.15 mts
Longitud de la red	53 mts
Ancho de la red	40 mts
Tiempo de duración de la falla	t= 0.5 seg (30 ciclos)
Relación X/R en el bus de falla	10
Longitud de las varillas de tierra	3 mts
Diámetro de las varillas de tierra	0.159 mts (5/8" \varnothing)

DISEÑO DE LA RED

CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR (COBRE DESNUDO)

Factor de decrecimiento D_f :

Para $X/R = 10$ y $t = 0.5$ seg de ecuación 65-IEEE Std. 80-1986: $D_f = 1.026$

Factor de proyección C_p :

No existe incremento en la corriente de falla.

$C_p = 1.0$

Corriente Máxima de Malla:

$I_c = 6600 \times 1.026 \times 1.0 = 6771.6$ Amp

Sección del conductor:

Para conductores mecánicos de bronce (atornillables)

$T_m = 450^\circ$

De tabla 2-IEEE Std. 80-1986:

Factor=6.6

$A = 6771.6 \times 6.6 = 44692.56$ circular mils

$A = 44.692$ KCM

El conductor calibre 2 AWG tiene una sección de 66.37 KCM, pero por resistencia mecánica emplearemos calibre mínimo 4/0 AWG (211.6 KCM) con diámetro $d = 0.0134$ mts.

CALCULO DEL FACTOR DE REDUCCION DEL VALOR NOMINAL DE ρ_s

Factor de reflexión:

$$K = \frac{200 - 3000}{200 + 3000} = -0.875$$

De la IEEE- Std. 80-1986

Factor de reducción= $C_s = 0.72$

CALCULO DE POTENCIAS TOLERABLES

POTENCIAL DE PASO:

$$E_{s_{70}} = \left[1000 + (6 \times 0.72 \times 3000) \right] \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} =$$

$$E_{s_{70}} = 3099.56 \text{ VOLTS}$$

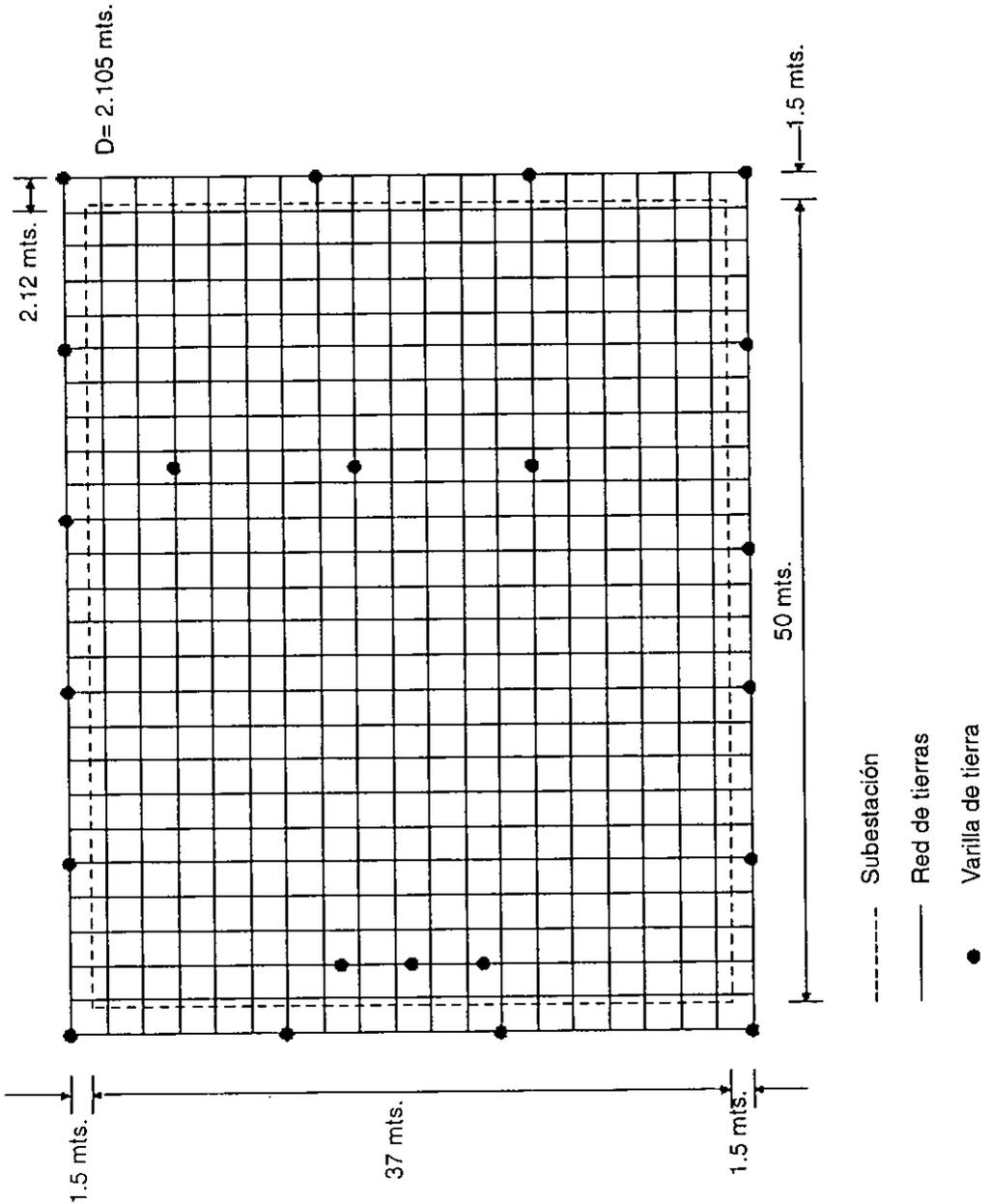
POTENCIAL DE CONTACTO:

$$E_{t_{70}} = (1000 + (1.5 \times 0.72 \times 3000)) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{t_{70}} = 941.4 \text{ VOLTS}$$

DISPOSICION DE CONDUCTORES EN LA RED

se considerarán 20 conductores paralelos y 26 conductores transversales como se muestra en la siguiente figura:



CALCULO DE POTENCIALES EN LA MALLA

Cálculo de de Lr:

$$Lr = 1.15 (22 \times 3) = 75.9 \text{ mts.}$$

Cálculo de L:

$$L = (20 \times 53) + (26 \times 40) + 75.9 = 2175.9 \text{ mts.}$$

Cálculo de n:

$$n = \sqrt{20 \times 26} = 22.8 \text{ Para calcular Em}$$

$$n = 26 \text{ Para calcular Es}$$

Cálculo de Kh:

$$Kh = \sqrt{1 + 0.6} = 1.2649$$

Cálculo de Km:

$$Km = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2.105^2}{16 \times 0.6 \times 0.0134} + \frac{(2.105 + (2 \times 0.6))^2}{8 \times 2.105 \times 0.0134} \right) - \frac{0.6}{4 \times 0.0134} + \frac{1}{1.2649} \ln \frac{8}{\pi (2 \times 22.8 - 1)} \right]$$

$$Km = \frac{1}{2\pi} \left[\ln (34.4452 + 48.4056 - 11.194) - 2.2634 \right]$$

$$Km = 0.3197$$

Cálculo de Ki:

$$Ki = 0.656 + (0.172 \times 22.8) = 4.5776$$

POTENCIAL DE CONTACTO EN LA MALLA

$$E_{\tau m} = 200 \times 0.3197 \times 4.5776 \times \frac{6771.6}{2175.9}$$

$$E_{\tau m} = 910.88 \text{ Volts}$$

Cálculo de Ks:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.6} + \frac{1}{2.105 + 0.6} + \frac{1}{2.105} (1 - 0.5^{24}) \right]$$

$$K_s = 0.5341$$

Cálculo de Ki:

$$K_i = 0.656 + (0.172 \times 26) = 5.128$$

POTENCIAL DE PASO EN LA MALLA

$$E_{sm} = 200 \times 0.5341 \times 5.128 \times \frac{6771.6}{2175.9}$$

$$E_{sm} = 1704.70 \text{ Volts}$$

COMPARACION DE POTENCIALES

$$910.88 < 941.4 \text{ Volts}$$

$$1704.70 < 3099.56 \text{ Volts}$$

La malla cumple con los potenciales.

CALCULO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA RED

$$R_g = 200 \left[\frac{1}{2100} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 2120}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6 \sqrt{\frac{20}{2120}}} \right) \right]$$

$$R_g = 1.9843 \text{ Ohms}$$

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

EMPLEANDO FORMULA DE SCHWARZ:

$$h' = \sqrt{0.0134 \times 0.6} = 0.0897$$

$$\text{Relación: Longitud / ancho} = 1.325$$

De la figura 18 IEEE std 80-1986:

$$\text{Para } h = (1/10) \sqrt{2120} = 4.60 \text{ mts.}$$

$$\text{Curva B = coeficiente } K_1 = 1.14$$

$$\text{Curva B = coeficiente } K_2 = 4.8$$

$$R_1 = \frac{200}{\pi \times 2100} \left[\ln \left(\frac{2 \times 2100}{0.0897} \right) + 1.14 \frac{2100}{\sqrt{2120}} - 4.8 \right]$$

$$R_1 = 1.7567 \text{ Ohms}$$

$$R_2 = \frac{200}{2 \times 22 \times \pi \times 3} \left[\ln \left(\frac{8 \times 3}{0.0159} \right) - 1 + \left(2 \times 1.14 \frac{3}{\sqrt{2120}} \right) \times (\sqrt{22} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = 4.0236 \text{ Ohms}$$

$$R_{12} = \frac{200}{\pi \times 2100} \left[\ln \left(\frac{2 \times 2100}{3} \right) + 1.14 \frac{2100}{\sqrt{2120}} - 4.8 + 1 \right]$$

$$R_{12} = 1.6798 \text{ Ohms}$$

CALCULO DE Rg

$$R_g = \frac{(1.7567 \times 4.0236) - (1.6798)^2}{1.7567 + 4.0236 - (2 \times 1.6798)}$$

Rg= 1.7542 Ohms

LA RED TIENE UNA RESISTENCIA MENOR A 5 OHMS (SUBESTACIONES DE DISTRIBUCION) POR LO QUE EL DISEÑO CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS.

CONCLUSIONES:

Dado el conocimiento de lo que es la protección de un sistema de tierras se puede llegar a conocer la mejor protección de una subestación por medio de este sistema.

En la fase de diseño, una red de tierras en una subestación debe asegurar que las potencias de paso y contacto en la malla sean menores a los tolerables por el hombre. Para la protección contra descargas, es importante contar con un medio de baja impedancia, con el cual la descarga pueda entrar a tierra en forma directa sin pasar a través de las cimentaciones.

En el caso de que el sistema de tierras no cumpla con los parámetros de seguridad, se deberá plantear un nuevo diseño que considere: Incremento en la red, mediante la reducción del espaciamiento de los conductores; un incremento en el número de varillas enterradas, y un tratamiento químico en los registros para bajar la resistividad del terreno.

Todas las subestaciones al igual que los sistemas eléctricos deben contar con un sistema de tierras adecuado durante el proceso de una falla para garantizar la seguridad del personal, proteger los diferentes equipos eléctricos, y limitar la elevación de potencial en el área de la red sobre el potencial natural del suelo.

BIBLIOGRAFIA

Elementos de diseño de Subestaciones Eléctricas
Gilberto Enriquez Harper
Limusa-Grupo Noriega Editores
México, 1993

Power System Grounding and Transients. An introduction
A.P. Sakis Meliopoulos
Marcel Dekker, Inc. 1988

ANSI / IEEE std 80-1986
IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding

Diseño de Subestaciones Eléctricas
Raúl Martín
Ed. Mc Graw Hill
México, 1990