

96
2es.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE TIERRAS PARA LA PROTECCIÓN DEL EQUIPO
DE UNA SUBESTACIÓN DE 115/23 KV**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
ÁREA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
PRESENTAN:

**JOSÉ ANTONIO DE LEÓN BRITO
GABRIEL DÍAZ LÓPEZ
GENARO HERNÁNDEZ COCA
ERNESTO MELÉNDEZ MELÉNDEZ**



Director de Tesis: ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

AGOSTO 1998

264875



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.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
NORMATIVIDAD EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS	
1.1 SEGURIDAD EN EL ATERRIZAMIENTO	3
1.2 CONDICIONES DE PELIGRO.....	4
1.3 LA CORRIENTE QUE CIRCULA POR EL CUERPO HUMANO.....	5
1.4 LIBRAMIENTO DE UNA FALLA.....	5
1.5 RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO.....	6
1.6 SITUACIONES TÍPICAS DE CHOQUE.....	7
CAPÍTULO 2	
COMPONENTES PRINCIPALES Y FUNCIÓN DE LOS MISMOS EN EL SISTEMA DE TIERRAS	
2.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE TIERRAS.....	8
2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRAS.....	8
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DE L SISTEMA DE TIERRA.....	10
2.4 PRINCIPALES CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	12
2.5 ELECTRODOS EXISTENTES.....	13
2.6 ASPECTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA MALLA.....	13
2.7 DISEÑO EN CONDICIONES DIFÍCILES.....	14
CAPÍTULO 3	
3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS	
3.1 CRITERIOS DE DISEÑO.....	15
3.2 PASOS PARA EL DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS.....	20
3.3 EFECTOS DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS.....	43
CAPÍTULO 4	
PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	

4.1 DEFINICIONES.....	44
4.2 PROPOSITOS DE LA PUESTA A TIERRA DEL SISTEMA.....	47
4.3 METODOS DE PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DE LOS SISTEMAS.....	48
4.3.1 SISTEMAS NO ATERRIZADOS O FLOTANTES.....	49
4.3.2 PUESTA A TIERRA A TRAVÉS DE UNA RESISTENCIA.....	50
4.3.3 CONEXIÓN A TIERRA A TRAVÉS DE UNA REACTANCIA.....	52
4.3.4 NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA.....	52
4.3.5 SISTEMAS SÓLIDAMENTE ATERRIZADOS.....	53

CAPÍTULO 5

CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO ELECTRÓNICO

5.1 CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO ELECTRÓNICO.....	54
5.2 SUBSISTEMAS DE TIERRA.....	56
5.2.1 SISTEMAS DE REFERENCIA A TIERRA PARA SEÑALES DE EQUIPO	
SENSIBLE.....	56
5.2.2 RESÚMEN DE LAS RECOMENDACIONES PARA LAS MALLAS DE	
REFERENCIA Y SU INSTALACIÓN.....	60
5.2.3 SUBSISTEMAS PARA LA PROTECCIÓN DEL PERSONAL.....	65
5.2.4 SUBSISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	66
5.3 CONEXIÓN A TIERRA DE CANALIZACIONES Y ACCESORIOS.....	66
5.4 CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO MECÁNICO QUE PUEDA AFECTAR AL EQUIPO	
SENSIBLE DE UN INMUEBLE.....	67
5.5 CONEXIÓN A TIERRA DE BLINDAJES.....	68
5.6 RUIDO DE TIERRA EN LA ENTRADA DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO.....	68
5.7 MÉTODO DE CONEXIÓN SEPARADO DEL SISTEMA DE TIERRA.....	69
5.8 CONEXIÓN A TIERRA EN RECEPTÁCULOS Y ACCESORIOS QUE ALIMENTAN	
VOLTAJE REGULADO.....	70
5.9 CONEXIÓN A TIERRA DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES.....	73

5.10 DISPOSITIVOS COMUNMENTE UTILIZADOS PARA MEJORAR LA ENERGÍA Y QUE DEBEN SER REFERENCIADOS A TIERRA.....	75
5.10.1 FILTROS.....	75
5.10.2 FILTROS CONTRA RUIDO.....	77
5.10.3 FILTROS DE ARMÓNICAS.....	78
5.10.4 SUPRESORES DE PICOS.....	79
5.10.5 COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE PICOS.....	80
5.10.6 REGULADORES DE VOLTAJE.....	82
5.10.7 TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO.....	82
5.10.8 FUENTES ININTERRUMPIBLES DE POTENCIA.....	82
5.11 PROBLEMAS POR RAYOS EN COMPUTADORAS.....	83
 CAPÍTULO 6	
RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	
6.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD.....	84
6.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE TERRENOS.....	89
6.3 EFECTO DE LOS HILOS DE GUARDA.....	90
6.4 PUNTAS PARARRAYOS.....	91
ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES.....	91
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.....	92
 CAPÍTULO 7	
MEMORIA DE CÁLCULO.....	93
 CAPÍTULO 8	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	106

INTRODUCCIÓN

En el diseño y proyecto de las instalaciones destinadas al suministro, o a la utilización de la energía eléctrica, una de las mayores preocupaciones de los ingenieros de diseño ha sido el cómo conectar a tierra equipos eléctricos, de 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, hasta las altas corrientes de las grandes subestaciones en alta tensión.

Por otro lado, uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones, ya sean de origen interno o externo, es el de disponer de un adecuado sistema de tierra.

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debidas a descargas atmosféricas o a fallas del equipo, obliga a tomar precauciones, para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no presenten un peligro para el personal; ya que intensidades de miles de amperes, producen gradientes de potencial muy elevados en la vecindad del punto de contacto a tierra; y si además se da la circunstancia de que algún ser vivo se apoye en dos puntos, entre los cuales exista una diferencia de potencial debida al gradiente indicado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que sobrepase el límite de su contractilidad muscular y provoque su caída.

En tal situación, la corriente que circula por su cuerpo aumenta, y si por desgracia ésta pasa por un órgano vital como el corazón, puede originar fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

El diseño se debe basar en la protección del personal y de los equipos, disipando las corrientes de falla sin que se eleve el potencial mas allá de lo permisible.

Debido a esto, los procedimientos de diseño tienen como fin garantizar que no existan voltajes peligrosos de paso, de contacto o de transferencia dentro de la subestación.

Es común pensar que en subestaciones, es suficiente tener una resistencia a tierra baja, para proteger los equipos y al personal, sin embargo, existen factores que son determinantes, ya que se pueden presentar potenciales peligrosos al momento de una falla de cortocircuito.

La resistividad del suelo para el diseño de una red de tierra, generalmente se determina recopilando datos de campo en el sitio en cuestión. Esta información es esencial para determinar tanto la composición general del suelo, así como la obtención de algunas ideas acerca de su homogeneidad.

Hay ocasiones, en las que es necesario realizar un tratamiento con sustancias químicas al suelo, cuando se presenta una alta resistividad.

Una vez instalada la malla de tierra, se puede verificar su resistencia a tierra con ayuda de algún método de medición recomendado por las normas.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

NORMATIVIDAD EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRAS

1.1 SEGURIDAD EN EL ATERRIZAMIENTO

En principio un sistema de tierras tiene dos objetivos principales:

- a) Proporcionar un medio para drenar las corrientes eléctricas bajo condiciones normales y de falla, sin exceder alguno de los límites de operación, de equipo o bien afectar de forma adversa la continuidad de servicio.
- b) Asegurar que una persona que se encuentre dentro del área que ocupa el sistema de tierra, no esté expuesta tan fácilmente al peligro de alguna descarga eléctrica.

La realidad es que muchas veces la gente cree que cualquier objeto aterrizado puede ser tocado con seguridad, esta mala interpretación ha ocasionado accidentes en el pasado debido a que una baja resistencia a tierra de la propia subestación no es garantía de seguridad.

No es simplemente la relación entre la resistencia del sistema de tierras y la máxima corriente de choque a la cual una persona puede estar expuesta, lo que determina la seguridad en una subestación. Así una subestación con una resistencia de tierra relativamente baja puede ser peligrosa bajo ciertas circunstancias. Mientras que otra subestación con muy alta resistencia puede ser segura o puede hacerse segura con diseños cuidadosos.

1.2 CONDICIONES DE PELIGRO

Durante la condición de falla a tierra, el flujo de corriente producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de la subestación. Si no se toman en cuenta las debidas precauciones en el diseño, los máximos gradientes de potencial a lo largo de la superficie de la subestación durante las condiciones de falla pueden ser de tal magnitud que pongan en peligro a una persona dentro de la misma, además también las diferencias de potencial peligrosas pueden desarrollarse entre estructuras o carcasas del equipo que esté aterrizado así como la tierra remota más próxima.

Circunstancias que pueden producir posibles accidentes de descarga eléctrica:

- a) Corrientes de falla a tierra relativamente altas en relación con el área del sistema de tierras.
- b) Resistividad del suelo y distribución de las corrientes de tierra tales que pueden producirse elevados gradientes de potencial en la superficie de la tierra.
- c) Presencia de un individuo en un punto, tiempo y posición tales que el cuerpo sea un puente entre dos puntos de una elevada diferencia de potencial.
- d) Ausencia de suficiente resistencia de contacto u otras resistencias en serie que limiten la corriente a través del cuerpo humano a un valor seguro bajo las circunstancias anteriores.
- e) Duración de la falla, del contacto del cuerpo y por lo tanto del flujo de corriente a través del cuerpo por un tiempo suficiente para causar daño dada la intensidad de corriente.

1.3 LA CORRIENTE QUE CIRCULA POR EL CUERPO HUMANO

Los efectos que produce la corriente eléctrica al circular a través de las partes vitales de cuerpo humano, dependen de la duración, magnitud y frecuencia de la misma. La consecuencia más peligrosa por estar expuesto al paso de la corriente eléctrica es una condición del corazón conocida como fibrilación ventricular, que es cuando la frecuencia de la corriente eléctrica altera la frecuencia del latido del corazón hasta que ocurre un paro cardíaco en la persona afectada.

El recierre después de una falla a tierra es común en la actualidad, en tales circunstancias, una persona sujeta al primer choque el cual no puede dañarlo en forma permanente, puede trastornarse de tal forma que sus articulaciones no respondan las ordenes de cerebro temporalmente.

Posteriormente un rápido recierre automático puede ocurrir.

Si este segundo choque ocurre después de un intervalo de tiempo relativamente corto antes de que la persona se haya recuperado, podría causar un serio accidente.

El efecto acumulativo de dos o más choques espaciados puede ser la suma de las duraciones de tiempo de los recierres permitidos como si fuera una sola exposición, para así evaluar la magnitud de la corriente a través del cuerpo.

1.4 LIBRAMIENTO DE UNA FALLA

Considerando la importancia de la duración de la falla, e implícitamente el factor de exposición del accidente, la rapidez de libramiento de la falla a tierra es ventajosa por dos razones:

1. - La probabilidad de un choque eléctrico se reduce enormemente debido a la rapidez del libramiento de la falla, en contraste con las situaciones en las cuales la corriente de falla puede persistir por algunos minutos.

2. -Las pruebas y experiencias demuestran que la probabilidad de un gran daño o la muerte también se reduce si la duración de la corriente que fluye a través del cuerpo es muy corta, el valor de la corriente permisible puede sin embargo estar basado en el tiempo de libramiento de los dispositivos de protección.

1.5 RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO

Para la corriente directa y para la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia. Esta resistencia está medida entre extremidades, esto es, entre mano y ambos pies o entre un pie y el otro.

En cualquiera de los dos casos el valor de ésta resistencia es difícil de establecer. La resistencia del cuerpo interno, no incluyendo la piel es de aproximadamente 300 ohms, sin embargo cuando se incluye la piel, e incluso el factor estado de ánimo de las personas, los valores de resistencia del cuerpo humano están dentro del rango de 500 a 3000 ohms.

Para altos voltajes y corrientes y corrientes (arriba de 1 kv y 5 [A]), la resistencia disminuye por quemadura o incluso perforación de la piel en el punto de contacto. Sin embargo la resistencia de contacto de una mano húmeda puede ser muy baja a cualquier voltaje.

El valor de la resistencia de los zapatos es incierto, aunque este dependiendo de las condiciones puede ser mucho más bajo que para la piel húmeda.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- b) Se ha seleccionado el valor de 1000 ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro.

1.6 SITUACIONES TÍPICAS DE CHOQUE

VOLTAJE DE PASO

Es la diferencia del potencial superficial que experimenta una persona parada, con los pies a 1 metro de separación y fuera de contacto con cualquier otro objeto.

VOLTAJE DE CONTACTO

Es la diferencia de potencial entre la elevación de potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde una persona esta parada, cuando al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura aterrizada

VOLTAJE DE MALLA

Es el máximo voltaje de contacto que se encuentra dentro de la malla de tierra.

VOLTAJE TRANSFERIDO

Es un caso especial de un voltaje de toque, en donde un voltaje es transferido hacia fuera de la subestación.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2

COMPONENTES PRINCIPALES Y FUNCIÓN DE LOS MISMOS EN EL SISTEMA DE TIERRAS

2.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE TIERRAS

Es el conjunto de elementos tales como la red o malla de conductores, electrodos o varillas de tierra, conectores y conductores de puesta a tierra de los diversos equipos, que interconectados en una forma adecuada en un determinado terreno nos permite obtener un circuito eléctrico de baja resistencia para poder conectar a tierra todos los elementos de la instalación que así lo requieran.

2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRAS

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

1. - CONDUCTORES
2. - VARILLAS
3. - CONECTORES

CONDUCTORES

Sirven para formar la retícula del sistema de tierras y para conectar a tierra los equipos.

Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre estañado copperweld, acero galvanizado o aluminio generalmente con temple semiduro.

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

El cobre debe ser el material más comúnmente usado para los conductores, ya que es relativamente económico y de excelente conductividad, además de ser resistente a la corrosión y a la fusión.

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 además de que con estas se efectúa periódicamente durante la época más seca del año la medición.

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

Como en 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 de la conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, así como una buena resistencia a la corrosión.

CONECTORES O JUNTAS

Son los elementos que nos sirven para unir a la red de tierra los electrodos profundos, estructuras, neutros de los bancos de transformadores, etc.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son principalmente de tres tipos:

- a) Conectores atomillados
- b) Conectores a presión
- c) Conectores soldables

Todos los tipos de conectores deben soportar la corriente de la red de tierra en forma continua.

Los conectores atornillados se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formado de dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión. Los conectores a presión son más económicos que los atomillados y dan mayor garantía de buen contacto.

Los cuales se fabrican en una sola pieza, mediante herramientas especiales se colocan para la unión de conductores, deben ser diseñados para una temperatura máxima de 250 a 300 °C. Los conductores soldables (cadweld) son los más económicos y seguros por lo que se usan con mucha frecuencia.

Son aquellos que mediante una reacción química exotérmica, (reducción del óxido de cobre por el aluminio liberando calor con aproximadamente 1800°C), los conductores y el conector se sueldan en una conexión molecular. Este tipo de conector, por naturaleza, soporta la misma temperatura de fusión del conductor.

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

1. Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce al circular por él corrientes elevadas (resistencia a la fusión).
2. Tener suficientemente asegurados a los conductores para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por la corriente de cortocircuito, además de no permitir que el conductor se mueva dentro de él.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TIERRA

- Resistencia a la corrosión, para retardar su deterioro en el ambiente donde se localiza.
- Conductividad eléctrica, de manera que no contribuya sustancialmente con las diferencias de potencial en el sistema de tierra.
- Capacidad de conducción de corriente, la suficiente para soportar los esfuerzos térmicos durante las condiciones más adversas impuestas por la magnitud y duración de las corrientes de falla.
- Resistencia mecánica, que soporte los esfuerzos electromecánicos, además del daño físico que puedan causar los equipos pesados dentro de la subestación.

La figura 3.2 y la tabla No.2 proporcionan una rápida referencia de los materiales más comunes, suponiendo los siguientes parámetros de diseño:

- Temperatura ambiente 40 [°C].
- Límite de temperatura de fusión dado en la tabla No.1.
- Temperatura máxima permisible para las juntas o uniones soldadas 450 [°C].
- Temperatura máxima permisible para cables críticos y juntas atornillados 250 [°C].

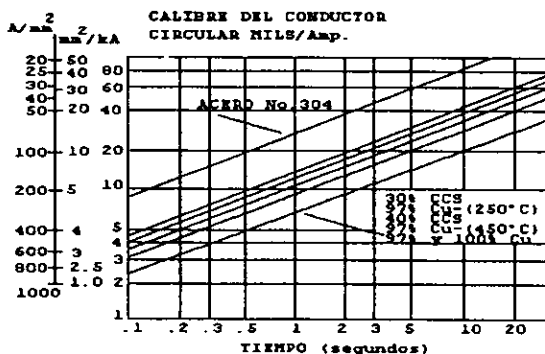


FIGURA (3.2)

Tiempo de falla Segundos	Calibre mínimos de conductor por unidad (cmils/A)					
	Cobre 100%	Cobre 97%	CCS 30%	CCS30%	Cobre 97%/Limite de Temperatura 450°C	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 No2.

2.4 PRINCIPALES CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Algunas de las razones para usar un sistema combinado de varillas verticales y conductores horizontales son las siguientes:

1. - En subestaciones un simple electrodo es por si mismo inadecuado para proveer un sistema de tierras seguro.
2. De forma contraria cuando varios electrodos están conectados uno con otro, así como con el neutro del sistema, y estructuras que deben ser aterrizadas, el resultado es más eficiente.
3. Si la magnitud de corriente por disipar hacia tierra es alta, el sólo uso de una malla que presente resistencia a tierra muy baja no podrá evitar que la elevación del potencial de tierra no genere gradientes peligrosos.

Un sistema que combina una malla horizontal y un número de varillas a tierra verticales a tierra verticales que penetra a una cierta profundidad del suelo, tiene las siguientes ventajas:

- a) Con los conductores horizontales (malla) se reduce el peligro de los altos voltajes de paso y de contacto en la superficie de la tierra, las varillas de tierra estabilizarán el diseño de tal sistema combinado, ya que con la lluvia la resistividad de la capa superior del suelo puede variar mientras que la resistividad de las capas del suelo más profundas permanece constante.
- b) Las varillas que penetran las capas de suelo más bajas son más efectivas para disipar la corriente de falla, cada vez que un suelo de dos capas es encontrado y la capa superior del suelo tiene resistividad más alta que la capa inferior. Otra buena razón es que el área donde se instala la subestación sea muy pequeña.
- c) Las varillas moderarán considerablemente el incremento de los gradientes de paso en la superficie cerca del perímetro de la malla.

2.5 ELECTRODOS EXISTENTES

Todos los electrodos de aterrizamiento caen dentro de dos categorías:

1. - Aquellos que forman parte inherente del establecimiento.
2. - Aquellos que han sido hechos específicamente para éste propósito.

Estos últimos suelen llamarse varillas de tierra, mallas, etc.

El tipo seleccionado depende del suelo encontrado y de la profundidad a la cual va a ser instalado.

Por ejemplo, las varillas de tierra son generalmente más económicos donde se localiza una capa de rocas de 10m, o más, bajo la superficie del terreno, mientras que tiras enterradas (en malla), o cables son preferidos para menores profundidades.

2.6 ASPECTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE LA MALLA

El análisis conceptual de una malla usualmente comienza con la inspección del plano de la subestación, mostrando la mayoría del equipo y las estructuras. Para establecer las ideas básicas y conceptos, los siguientes puntos pueden servir para comenzar un diseño típico de una malla de tierras.

1. - Un conductor continuo puede rodear el perímetro del área de trabajo. Esta medida ayuda a evitar altas concentraciones de corriente y por tanto altos gradientes de potencial.
2. - Dentro del conductor que rodea la periferia, los conductores pueden ser colocados en líneas paralelas y a lo largo de las estructuras o filas de equipos, para proveer una conexión a tierra cercana.
3. - Esta malla puede ser tendida sobre todo el patio de maniobras de la subestación y a menudo más allá de la cerca de protección.
- 4- La relación de los lados de la malla usualmente es de 1:1 hasta 1:3. Las conexiones en los cruces tienen un efecto relativamente pequeño en la reducción de la resistencia de la malla.

Su función principal es asegurar un adecuado control en los potenciales superficiales.

2.7 DISEÑO EN CONDICIONES DIFÍCILES

En áreas donde la resistividad del suelo es bastante alta o el espacio de la subestación es reducido, no es tan fácil obtener un sistema de tierra.

Podemos observar que en nuestro diseño, el suelo tiene una resistividad muy alta sin embargo el área es muy accesible.

Para estos casos se dan las siguientes soluciones:

1. Conexiones a mallas de tierra remotas y tierras adyacentes disponibles; un sistema combinado que utilice instalaciones separadas dentro de edificios, bóvedas, etc.

El uso predominante de electrodos de tierra remotos requiere cuidadosas consideraciones sobre los potenciales transferidos, debido a que pueden desarrollarse gradientes de potencial entre el local y la tierra remota.

2. El uso de varillas de tierra profundas y buenas perforaciones en la tierra, en combinación con tratamientos con sustancias químicas del suelo como el GEM o el GAP, o el uso de la bentonita mezclada con arcilla.
3. En lo que respecta al uso de tapetes de conductor, en áreas expuestas es factible combinar los materiales aislantes y las parrillas, primero para igualar los gradientes cercanos a la superficie y después para aumentar la resistencia de contacto entre la superficie y las estructuras metálicas debajo del suelo.

Una aplicación práctica de las parrillas puede consistir de alambre de acero recubierto con cobre del calibre 6 AWG, en un arreglo de malla con separaciones de 0.6x0.6 metros, instalado debajo de la tierra a una profundidad de 0.05 a 0.15 metros y sobre la malla de tierra principal, la cual está instalada a mayor profundidad, usualmente entre 0.3 y 0.5 metros.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS.

3.1. - CRITERIOS DE DISEÑO.

Los problemas asociados con los voltajes peligrosos de paso y de contacto, pueden ser diversos, como es el caso de la operación manual de los equipos, en donde el operador se encuentra más expuesto a posibles accidentes en caso de un mal aterrizamiento de los mismos, o también, la posibilidad de que la cerca que delimita a la subestación y que está expuesta a entrar en contacto con el personal, se le induzcan voltajes peligrosos, por lo que dicha malla hay que considerarla dentro del área de protección del sistema de aterrizamiento.

Para una subestación, una red de tierra se forma en general por una cuadrícula de algún material conductor (cobre desnudo temple semiduro) enterrada a cierta profundidad, formando una malla con conductores paralelos en ambos sentidos, con electrodos o varillas colocadas en las esquinas y en determinadas partes de la red.

Como se mencionó anteriormente el diseño de un sistema de tierras de una subestación se tienen dos puntos importantes que cumplir:

1. Proporcionar un medio para disipar corrientes eléctricas hacia tierra, sin exceder cualquier límite de operación de los equipos.
2. Asegurar que una persona que se encuentre en la vecindad de la subestación no esté expuesta a daños o choques eléctricos críticos.

El procedimiento de diseño descrito aquí está basado en la seguridad de los potenciales peligrosos de paso y de contacto, dentro o inmediatamente fuera de la cerca de la subestación. Puesto que el potencial de malla es posiblemente el peor voltaje de contacto dentro de la subestación, el voltaje de malla será usado como la base de éste procedimiento de diseño.

Los voltajes de paso son menos peligrosos que los voltajes de malla. La seguridad dentro del área de la subestación se alcanza con la presencia de una capa superficial de alta resistividad, la cual no se extiende fuera de la cerca que la rodea, por lo cual los voltajes de paso fuera de la subestación pueden causar diferencias de potencial peligrosas.

Para espaciamientos iguales en la malla de tierra, el voltaje de malla se incrementará a lo largo de la misma desde el centro hacia las esquinas.

La relación de éste incremento dependerá del tamaño de la malla, número y localización de las varillas de tierra, espaciamiento de los conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, así como, del perfil de resistividad del suelo y del área de la subestación.

Se ha encontrado que los siguientes parámetros tienen un gran impacto en el diseño de la malla: Máxima corriente de malla (I_G), duración de la falla (t_f), duración del choque (T_s), resistividad el terreno (ρ), resistividad del material superficial (ρ_s) así como, la geometría de la malla.

El área del sistema de tierra, el espaciamiento del conductor y la profundidad de la malla de tierra tienen mayor impacto en el voltaje de malla, mientras que los parámetros tales como el diámetro del conductor y el grosor del material superficial tienen menor impacto.

La duración de la falla y la duración del choque son normalmente asumidas iguales a menos que la duración de la falla sea la suma de los choques sucesivos, tal como en los recierres. La selección del tiempo de falla deberá reflejar la rapidez de los dispositivos de protección. La selección de T_s y t_f deberá resultar de la combinación más pesimista del factor de decremento de la corriente de falla y de la corriente permisible en el cuerpo. Algunos valores típicos para t_f y T_s están dentro del intervalo de 0.2 a 1.0 segundos.

La resistencia de malla y los gradientes de voltaje dentro de la subestación son dependientes de la resistividad del suelo.

El cálculo para el diseño se simplifica cuando se asume una resistividad de suelo uniforme. Para ello se debe tomar en cuenta las siguientes condiciones:

- El suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre dos valores extremos de resistividad es menor al 30%.

En éste caso un simple promedio de todos los valores de resistividad puede ser usado en las ecuaciones de resistencia de la malla.

- Cuando un modelo equivalente de suelo de dos capas es determinado, y el sistema de tierra se encuentra en la capa superior, el valor de la resistividad de la capa superior deberá considerarse.

Para una mayor seguridad dentro de la subestación se coloca una capa superficial de alta resistividad para aumentar la resistencia en serie con el cuerpo humano.

Una capa delgada de grava o de concreto hidráulico ayuda a limitar la corriente a través del cuerpo humano. Para la capa superficial se utilizan materiales con resistividad de 1000 a 10,000[Ω-m], generalmente.

La limitación de los parámetros de una malla de tierra está basada en aspectos físicos y económicos de su instalación. La limitación económica es la instalación de una placa de cobre para el sistema de tierra, mientras que una limitación física es por ejemplo la reducción del espacio entre conductores.

El espaciamiento típico entre conductores es de 3 a 15 metros, donde la profundidad de la malla está dentro del intervalo de 0.5 y 1.5 metros.

Para los calibres de los conductores dentro del intervalo del 2 AWG al 500 MCM, el diámetro del conductor no tiene efectos sobre el voltaje de contacto.

El área del sistema de tierra es el factor geométrico más importante para determinar la resistencia de la malla.

El diagrama de bloques de la figura (3.1) da la secuencia de diseño de la malla de tierra:

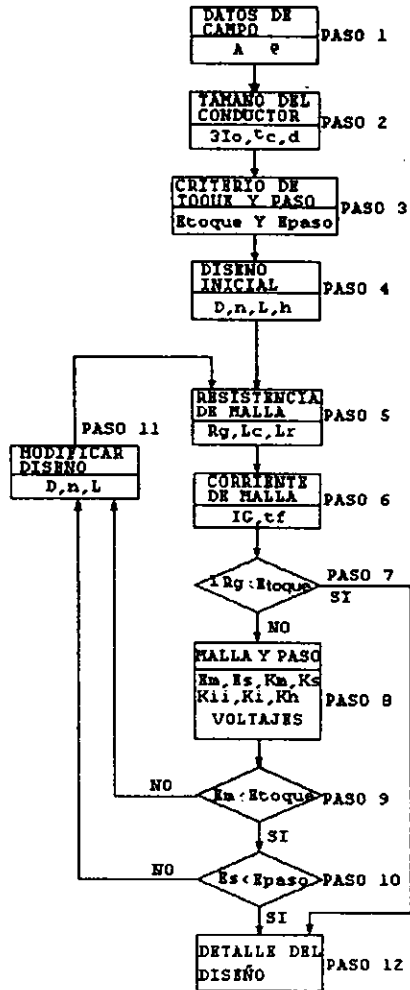


DIAGRAMA DE BLOQUES
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

FIGURA (3.1)

REFERENCIA : ANSI/IEEE Std. 80-1986

Los parámetros que se muestran en el diagrama se indican en la siguiente lista:

A	Area cubierta por la red [m ²].
μ	Resistividad del terreno [Ω -m].
3I _o	Corriente de falla simétrica en la Subestación para dimensionar el conductor de tierra [A].
t _c	Tiempo de duración de la corriente de falla para dimensionar el conductor de tierra [s].
d	Diámetro del conductor de la malla [m].
E _{CONT 50}	Voltaje de contacto tolerable por el cuerpo humano, para una persona de 50 kg de peso [V].
E _{CONT 70}	Voltaje de contacto tolerable por el cuerpo humano, para una persona de 70 kg de peso [V].
E _{PASO 50}	Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano, para una persona de 50 kg de peso [V].
E _{PASO 70}	Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano, para una persona de 70 kg de peso [V].
D	Espaciamiento entre conductores paralelos [m].
n	Número de conductores paralelos en una dirección [-].
L	Longitud total de conductores del sistema de tierras, incluyendo varillas de tierra [m].
h	Profundidad de enterramiento de los conductores de la malla [m].
R _g	Resistencia del sistema de tierras [Ω].
L _c	Longitud total de conductores de malla [m].
L _r	Longitud total de conductores de las varillas de tierra [m].
I _g	Máxima corriente que fluye de la malla de tierra al terreno que lo rodea [A].
t _f	Duración de la corriente de falla para determinar el factor de decremento[s].
E _m	Voltaje de contacto en la malla, [V].
E _s	Voltaje de paso en la malla, en volts [V].

Km	Factor de espaciamiento para voltaje de malla [-].
Ks	Factor de espaciamiento para voltaje de paso [-].
Ki	Factor de corrección para la geometría de la red [-].
Kii	Factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores interiores de la malla [-].
Kh	Factor de corrección que toma en cuenta el efecto de la profundidad de la malla [-].

3.2. -PASOS PARA EL DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS.

Según la norma:

IEEE std. 80-1986. GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING.

PASO 1. -DATOS DE CAMPO.

Área ocupada por la malla de tierra y resistividad del terreno.

El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general de arreglo del equipo de la subestación.

En éste plano están indicados los límites y ubicaciones de los equipos con acotaciones a escala, considerando el proyecto completo (inmediato y futuro).

La resistividad del terreno podrá determinarse con alguno de los métodos indicados por la norma, o bien por datos promedio proporcionados en tablas.

Las pruebas de resistividad determinarán el perfil de resistividad y el modelo del suelo a utilizar (uniforme o de dos capas).

PASO 2. -DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR.

El calibre del conductor se determina por medio de las ecuaciones que a continuación se muestran, la corriente de falla $3I_{so}$ deberá ser la corriente máxima de falla esperada y podrá ser conducida por el sistema de tierra.

La corriente de falla podrá calcularse con cualquiera de los métodos empleados para el cálculo de cortocircuito.

El tiempo de duración de la falla reflejará el tiempo máximo posible para el libramiento de la falla, incluido el de operación de una protección de respaldo.

La siguiente ecuación evalúa la capacidad de conducción de corriente para algunos conductores de los cuales las constantes del material son conocidas o bien pueden ser determinadas por medio de cálculos.

$$I = A \sqrt{\frac{Tcap * 10^4}{tc * \alpha r * \rho r} \ln \frac{K_0 + Tm}{K_0 + Ta}} \quad (1)$$

donde:

- I Corriente rms [kA].
 - A Sección transversal del conductor [mm²].
 - Ta Temperatura ambiente en [°C].
 - Tm Temperatura máxima permisible [°C].
 - tr Temperatura de referencia para las constantes del material [°C].
 - α0 Coeficiente térmico de resistividad a 0°C.
 - αr Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia Tr.
 - ρr Resistividad del conductor a la temperatura de referencia Tr [Ω-cm].
 - Ko 1/α0 ó (1/αr)-Tr
 - tc Tiempo de duración del flujo de corriente en segundos [s].
 - Tcap Factor de capacidad térmica en [J/cm³°C].
- αr y ρr son encontrados para la misma temperatura de referencia (20° C).

Las constantes de algunos materiales se muestran en la tabla No1.

Descripción	Conductividad del material	Factor α a 20°C	K0 a 0°C (1/ α)	Temperatura de fusión °C	resistividad a 20°C ($\mu\Omega/cm$)	Factor TCAP Valor Efectivo (J/cm ³ /°C)
Cobre suave recocido	100	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Cobre duro	97	0.00381	242	1084	1.7747	3.422
Cobre con alma de acero	40	0.00378	245	1084/1300	4.397	3.846
Cobre con alma de acero	30	0.00378	245	1084/1300	5.862	3.846
Aluminio EC	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminio aleación 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminio aleación 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminio con alma de acero	20.3	0.00360	258	660/1300	8.4805	2.670
Acero revestido de Zinc	8.5	0.00320	293	419/1300	20.1	3.931
Acero inoxidable	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

TABLA No1 CONSTANTES DE MATERIALES.

En caso de que el calibre del conductor sea dado en circularmils, la ecuación anterior se modifica a:

$$I = 5.06 * 10^{-6} \text{ Acmls} \sqrt{\frac{Tcap}{tc * \alpha * \rho} \ln \frac{K_0 + Tm}{K_0 + Ta}} \quad (2)$$

Cuando se trabaje con materiales que no estén listados en la tabla No 1., los manuales de ingeniería proveerán la información suficiente, incluyendo el calor y peso específicos, para poder determinar el Tcap.

El calor c específico (cal/ gr / °C) y el peso específico (gr / cm³) son relacionados para obtener la capacidad térmica por unidad de volumen (W / cm³).

$$(\text{cal / gr / °C}) * (\text{gr / cm}^3) = 4.184 (\text{W / cm}^3)$$

$$Ce * Pe = 4.184 (\text{W / cm}^3)$$

$$1 [\text{W}] = 1 \text{ Joule}$$

De ésta forma el Tcap está definido por:

$$Tcap = 4.184 * ce * Pe$$

donde:

Ce= Calor específico en Cal / gr / °C.

Pe= Peso específico en gr/cm³

Una vez que el Tcap es determinado, las ecuaciones (1) ó (2) pueden ser usadas para determinar la capacidad de conducción de corriente del conductor.

Las ecuaciones (1) y (2) pueden ordenarse de tal manera que se calcule el tamaño o calibre del conductor requerido en función de la corriente:

$$Amm^2 = I \sqrt{\frac{Tc \cdot \alpha r \cdot \rho r \cdot 10^4}{Tcap}} \sqrt{\ln \left[1 + \frac{Tm - Ta}{K_0 + Ta} \right]} \quad (3)$$

$$Acmils = 1973.52I \sqrt{\frac{Tc \cdot \alpha r \cdot \rho r \cdot 10^4}{Tcap}} \sqrt{\ln \left[1 + \frac{Tm - Ta}{K_0 + Ta} \right]} \quad (4)$$

Por norma y debido a los esfuerzos mecánicos ocasionados por la corriente de corto circuito, el calibre del conductor para una red de tierra será como mínimo de calibre 4/0 AWG (211.6 KCM).

PASO 3. CÁLCULO DE POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO TOLERABLES

La figura 3.3 define el circuito equivalente de un contacto pie a pie. El potencial "U" es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos sobre la superficie del terreno separado por la distancia de un paso.

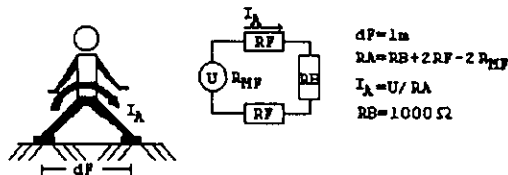


figura (3.3)

La resistencia equivalente para el circuito de potencial de paso es:

$$R_A = R_B + 2(R_{\text{Foot}} - R_{M_{\text{Foot}}}) \quad (5)$$

El circuito equivalente del contacto entre mano y los dos pies se muestra en la figura(3.4)

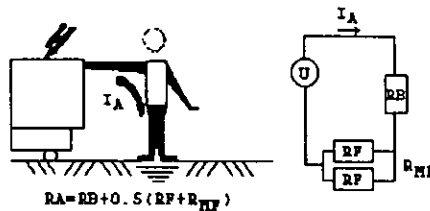


FIGURA (3.4)

La resistencia equivalente para el circuito del potencial de contacto está dado por:

$$R_A = R_B + \left(\frac{1}{2}\right)(R_{\text{Foot}} + R_{M_{\text{Foot}}}) \quad (6)$$

La resistencia equivalente R_A está en función de la resistencia del cuerpo humano (de una mano a ambos pies, entre mano y mano, o entre un pie y el otro), y se considera para fines de cálculo $R=1000 [\Omega]$.

Si representamos al pie humano como un disco metálico conductor, la resistencia propia y mutua para dos discos metálicos de radio "b", separados a una distancia "dfoot" sobre la superficie de un terreno homogéneo de resistividad "ρ" son:

$$R_{\text{foot}} = \frac{\rho}{4b} \quad (7)$$

$$R_{m\text{foot}} = \frac{\rho}{(2\pi * d\text{foot})} \quad (8)$$

Donde:

R_{foot} Resistencia propia a tierra de cada pie en ohms.

$R_{m\text{foot}}$ Resistencia mutua entre los pies en ohms.

b Radio equivalente de un pie en metros.

d_{foot} Separación de los pies en metros.

Las resistencias en serie y en paralelo bajo los dos pies son:

$$R_2\text{FS} = 2(R_{\text{foot}} - R_{m\text{foot}}) = 2\left(\frac{\rho}{4b} - \frac{\rho}{2\pi * d\text{foot}}\right) \quad (9)$$

$$R_2\text{FP} = \left(\frac{1}{2}\right) (R_{\text{foot}} + R_{m\text{foot}}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{4b} + \frac{\rho}{2\pi * d\text{foot}}\right) \quad (10)$$

donde:

$R_2\text{FS}$ Resistencia de tierra de los dos pies en serie.

$R_2\text{FP}$ Resistencia de tierra de los dos pies en paralelo.

Para fines de cálculo tenemos que el radio del disco equivalente al pie es de 0.08 metros (3 pulgadas), y despreciando el término correspondiente a la resistencia mutua podemos ver que:

$$R_2\text{FS} = 2\left(\frac{\rho}{4}(0.08) - 0\right) = 6.25\rho \quad (11)$$

$$R_2\text{FP} = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{4}(0.08) - 0\right) = 1.5625\rho \quad (12)$$

Por tanto las ecuaciones en serie y paralelo de las resistencias de los dos pies en términos de la resistividad se calculan como:

$$R_2FS=6\rho \quad (13)$$

$$R_2FP=1.5\rho \quad (14)$$

El término de resistencia mutua lo podemos despreciar y suponiendo para fines prácticos "b" siempre igual a 0.08 metros.

Con base en las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelo de los dos pies; de las ecuaciones (13) y (14) usadas para un suelo uniforme.

$$R_2FS = 6.0 C_s (h_s, K) \rho_s \quad (15)$$

$$R_2FP = 1.5 C_s (h_s, K) \rho_s \quad (16)$$

Los potenciales de paso y contacto tolerables por el cuerpo humano, para pesos de 50 y 70 kg respectivamente se calculan con las ecuaciones:

$$E_{PASO} = (RB + R_2FS) I_B \quad (17)$$

$$E_{paso50kg} = (1000 + 6C_s (h_s, K) \rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{I_s}} \right) \quad (18)$$

$$E_{paso70kg} = (1000 + 6C_s (h_s, K) \rho_s) \left(\frac{0.157}{\sqrt{I_s}} \right) \quad (19)$$

$$E_{cont} = (RB+R_2FP) I_B \quad (20)$$

$$E_{cont50kg} = (1000 + 1.5C_s (h_s, K) \rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{I_s}} \right) \quad (21)$$

$$E_{cont70kg} = (1000 + 1.5C_s (h_s, K) \rho_s) \left(\frac{0.157}{\sqrt{I_s}} \right) \quad (22)$$

donde:

I_b Corriente permisible por el cuerpo humano.

Para una persona de 50 kg:

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{Ts}}$$

Para una persona de 70 kg:

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{Ts}}$$

donde:

t_s Duración del flujo de corriente en segundos.

C_s Factor de reducción del valor nominal de la resistividad superficial, y puede tener los siguientes valores:

$C_s=1$ cuando la resistividad superficial es igual a la resistividad del terreno.

En cualquier otro caso:

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_s}{0.08} \right)^2}} \right] \quad (23)$$

Para este último caso, en el que $C_s < 1$, donde C_s es una función de (h_s, K) , los valores de C_s se grafican en la figura (3.5):

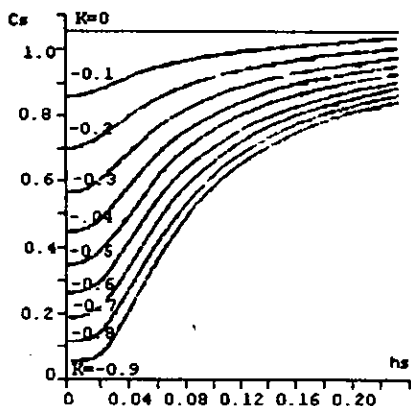


FIGURA (3.5)

El factor $K = \frac{(\rho - \rho_s)}{(\rho + \rho_s)}$ es el factor de reflexión (24)

Los voltajes reales de paso y de contacto deberán ser menores a los voltajes máximos permisibles de paso y de contacto.

PASO 4. - DISEÑO INICIAL DE LA MALLA.

El diseño preliminar de la malla deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación. Se instalarán 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 varillas de tierra, deberá basarse en la corriente IG y en el área a proteger por la malla.

PASO 5. - RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA

Puede determinarse un valor preliminar de resistencia de la malla con las ecuaciones indicadas posteriormente.

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

Como una aproximación podemos calcular el valor mínimo de la resistencia a tierra de la subestación en suelo uniforme por medio de una fórmula que considera una placa metálica circular y conocida también la resistividad del terreno.

$$R_g = \left(\frac{\rho}{4}\right)\sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (25)$$

donde:

- R_g Resistencia a tierra de la red en ohms.
- ρ Resistividad promedio del suelo en ohms-metro.
- A Área ocupada por la malla de tierra en m².

Considerando la longitud total de conductores enterrados de la red en metros, se puede obtener un valor límite de la resistencia,

Agregando un término que nos indica que la resistencia de cualquier sistema que consiste en un número de conductores es mucho mayor que el formado por una placa sólida, y que ésta diferencia decrecerá cuando se incremente la longitud total que nos representan los conductores enterrados, aproximándose éste término a cero cuando "L" tienda a ser muy grande, alcanzando la condición de placa sólida.

$$R_g = \left(\frac{\rho}{4}\right) \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L}} \quad (26)$$

donde:

L Longitud total de conductores enterrados de la red, en metros.

Las ecuaciones anteriores se emplean con bastante precisión para profundidades de la red menores a 0.25 metros.

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

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} * \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (27)$$

donde:

h es la profundidad a la que se entierra la malla, en metros.

La ecuación (24) se debe usar sólo para determinar un valor preliminar de la resistencia a tierra.

Las ecuaciones (25) y (26) son útiles para calcular la elevación del potencial a tierra para evaluar un diseño preliminar y determinar la longitud aproximada de los conductores enterrados que se necesita para el control de los voltajes de paso y contacto; para nuestra aplicación la ecuación (26) puede emplearse con razonable precisión.

Para el diseño final, puede encontrarse estimaciones más precisas de la resistencia, especialmente cuando en los cálculos se considera la resistencia de las varillas mediante la fórmula de Schwarz que se explica a continuación.

3.2.2. - FÓRMULA DE SCHWARZ.

La resistencia total del sistema de tierra que consiste en una combinación de conductores horizontales formando una malla y electrodos verticales (varillas), es menor que la resistencia de cualquiera de los componentes por separado, pero mayor que su combinación en paralelo.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (28)$$

donde:

R1 Resistencia de los conductores de la malla [Ω].

R2 Resistencia de todas las varillas de tierra [Ω].

R12 Resistencia mutua entre el grupo de conductores y el grupo de varillas [Ω].

Esta fórmula considera que el suelo es uniforme. Sin embargo, puede ser que al enterrarse la varilla, alcance capas de suelo de mayor conductividad entonces la expresión anterior se considera que:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi d_1} \left(\ln \frac{2l_1}{h} + K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \quad (29)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2n\pi d_2} \left(\ln \frac{8l_2}{d_2} - 1 + 2K_1 \left(\frac{l_2}{\sqrt{A}} \right) (\sqrt{n} - 1) \right)^2 \quad (30)$$

$$R_{12} = \frac{\rho_a}{\pi d_1} \left(\ln \frac{2l_1}{l_2} + K_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 + 1 \right) \quad (31)$$

donde:

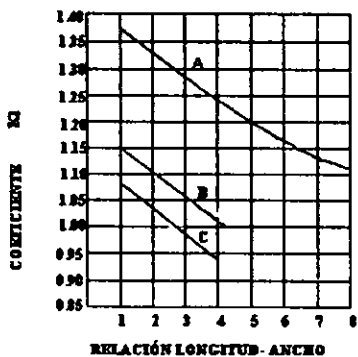
ρ_1 Resistividad del terreno a una profundidad "h" de los conductores, en [Ω -m].

ρ_a Resistividad aparente del terreno vista por la varilla de tierra, en [Ω -m].

- H **Espesor de la capa superior del terreno, en metros.**
- ρ_2 **Resistividad del terreno desde la profundidad de "H" hacia abajo, en [Ω -m].**
- ℓ_1 **Longitud total de los conductores de la red, en metros.**
- ℓ_2 **Longitud promedio de la varilla de tierra, en metros.**
- h **Profundidad de enterramiento de la red, en metros.**
- h' **Coficiente de la profundidad de enterramiento**
 $h' = \sqrt{d_1 h}$ para conductores enterrados a una profundidad "h"
 $h' = 0.5d_1$ para conductores localizados a h=0 (sobre la superficie).
- A **Area cubierta por la red, de dimensiones "a,b", en metros.**
- n **Número de varillas de tierra localizadas en el área "A" K1,K2 constantes relacionadas con la geometría del sistema (ver gráficas respectivas).**
- d1 **Diámetro del conductor de la red, en metros.**
- d2 **Diámetro de las varillas de tierra, en metros.**
- a **Ancho de la red, en metros.**
- b **Largo de la red, en metros.**

COEFICIENTES K1 Y K2 DE LA FÓRMULA DE SCHWARZ

Gráfica de k1, k2



Curva A — Para $h=0$

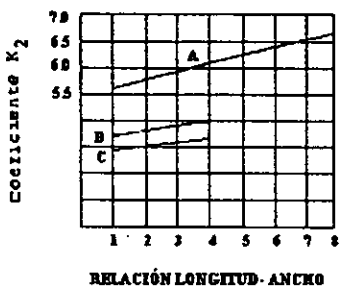
$$r_A = -0,04x + 1,42$$

Curva B — Para $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$r_B = -0,05x + 1,20$$

Curva C — Para $h = 1/8 \sqrt{\text{AREA}}$

$$r_C = -0,05x + 1,00$$



Curva A — Para $h=0$

$$r_A = 0,15x + 5,50$$

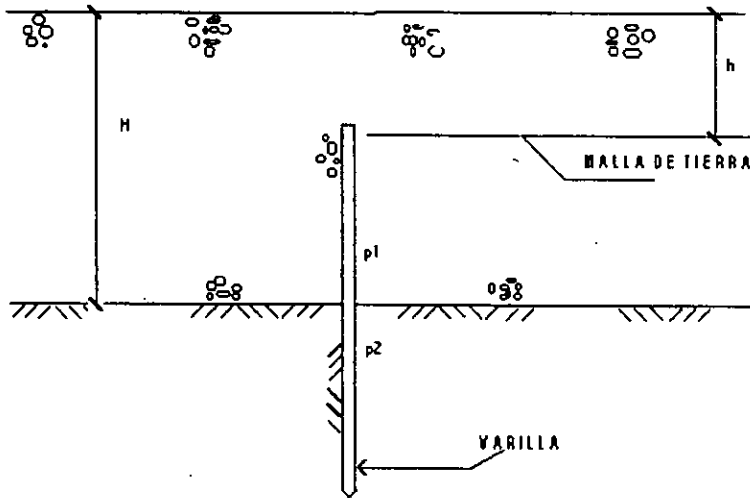
Curva B — PARA $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$r_B = 0,10x + 4,60$$

Curva C — PARA $h = 1/8 \sqrt{\text{AREA}}$

$$r_C = -0,05x + 4,60$$

RESISTIVIDAD APARENTE VISTA POR UNA VARILLA DE TIERRA EN UN MODELO DE DOS CAPAS



Las ecuaciones (29),(30) y (31) son válidas para suelos de dos capas, una superior de espesor " H ", con un cierto valor de resistividad y por donde penetran las varillas y una inferior de más baja resistividad con la cual las varillas hacen contacto.

Entonces, para $\rho_1 \geq \rho_2$, la malla se localiza en la capa de resistividad " ρ_1 " pero las varillas están en contacto tanto con la capa de resistividad " ρ_1 "

como la capa de resistividad " ρ_2 ", por lo que R_2 y R_{12} se calculan con una resistividad aparente "vista" por las varillas de tierra.

$$\rho_a = \frac{l_2(\rho_1\rho_2)}{\rho_2 H + \rho_1(l_2 - H)}$$

Para el caso más general, en el que la parte superior de las varillas están a la misma profundidad de la malla:

$$\rho_a = \frac{l_2(\rho_1\rho_2)}{\rho_2(H - h) + \rho_1(l_2 + h - H)}$$

Para suelos de resistividad uniforme:

$$\rho_2 = \rho_1$$

Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es muy grande (ρ_2 no menor que $0.2\rho_1$) y el espesor de la capa superior "H" es al menos $0.1b$, las ecuaciones anteriores pueden considerarse bastante precisas.

PASO 6. - CORRIENTE DE MALLA.

La corriente IG se determina por la ecuación:

$$IG = C_p D_f I_g \quad (32)$$

donde:

I_g Corriente máxima de malla.

D_f Factor de decremento para un factor de duración total de la falla " t_f ", en segundos, cuya ecuación es:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} * (1 - e^{-2(t_f/T_a)})} \quad (33)$$

donde:

Ta Se define como constante de tiempo subtransitoria en segundos.

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

$$w = 2\pi f$$

Para sistemas de 60 Hz tenemos que $w = 120\pi$.

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

Cp Con el factor de proyección debemos tomar en consideración un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores; pues las modificaciones a la red de tierras resultan costosas y generalmente se omiten, dando motivo a introducir inseguridad en el sistema.

Este efecto puede tomarse en cuenta disminuyendo la impedancia del sistema o aplicando éste factor de seguridad al valor calculado de la corriente de falla.

Ig Corriente simétrica de malla (valor rms) en amperes.

Para evitar un sobre dimensionamiento de la malla, se usará en el diseño únicamente aquella parte de la corriente total de falla 3Io 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 IG deberá reflejar la peor condición de falla (tipo y localización), el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema eléctrico.

PASO 7.-COMPARACIÓN DE POTENCIALES

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

PASO 8.-CÁLCULO DE POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO

Los potenciales de paso y de contacto en la malla, se calcularán con las ecuaciones siguientes:

POTENCIAL DE CONTACTO EN MALLA

$$E_m = \rho K_m K_i \frac{I_G}{L} \quad (34)$$

Es el producto de la resistividad del terreno ρ , el factor geométrico K_m , el factor de corrección K_i y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado $\frac{I_G}{L}$.

Donde el factor K_m se calcula como:

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

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 por toda la malla.

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

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

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

donde:

h profundidad de la malla, en metros.

H₀ 1 metro (profundidad de referencia de la malla).

D, n y d se definen en la lista de parámetros del diagrama de bloques.

Cálculo del factor K_i :

$$k_i = 0.656 + 0.172n$$

Cálculo de la longitud L:

Para mallas con varillas de tierra

$$L = L_c + 1.15L_r \quad (35)$$

donde:

L_c Longitud de conductores enterrados.

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

$$L = L_c + L_r$$

POTENCIAL DE PASO EN MALLA

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_s = \rho K_s K_i \frac{I_G}{L} \quad (36)$$

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

CÁLCULO DEL FACTOR K_s

Para una profundidad $0.25\text{m} < h < 2.5\text{m}$

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

Para una profundidad menor que 0.25 metros se utiliza la fórmula:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right)$$

donde:

$$W = 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/(n-1)$$

para $n \geq 6$

$$W \approx \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423$$

El empleo de las diferentes ecuaciones para el factor K_s , depende de la profundidad⁴⁰

h de la malla, ya que el potencial de paso decrece rápidamente cuando se incrementa la profundidad.

3.2.3.- LIMITACIONES EN EL EMPLEO DE LAS ECUACIONES

Cuando se emplean las ecuaciones anteriores, se recomienda los siguientes límites para aquellas mallas que sean cuadradas o rectangulares y que tengan el mismo número de conductores en ambas direcciones:

$$n \leq 25$$

$$0.25m \leq h \leq 2.5m$$

$$d < 0.25h$$

$$D > 2.5m$$

Para mallas rectangulares, con conductores igualmente espaciados en ambas direcciones (retícula cuadrada), el valor de "n" para calcular los valores de K_m y K_i del potencial de contacto E_m , será la media geométrica del número de conductores en ambas direcciones:

$$n = \sqrt{n_A * n_B} \quad (37)$$

El valor de n para calcular los factores K_s y K_i del potencial de paso E_s , será el valor máximo de n_A y n_B .

$$n = \max(n_A, n_B) \quad (38)$$

3.2.4.- LONGITUD MÍNIMA DE CONDUCTORES EN LA MALLA.

Una simple ecuación puede ser desarrollada para permitir una determinación preliminar del conductor enterrado para mantener el máximo potencial de contacto dentro del área aterrizada, dentro de los límites de seguridad establecidos en las ecuaciones de potencial de contacto tolerables e igualando éstas ecuaciones con la ecuación para potencial de contacto en malla.

Para $E_m < E_{cont} 50kg$:

$$KmKi\rho I \frac{I_G}{L} < (1000 + 1.5Cs (hs, K) \rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{Ts}} \right)$$

Ordenando la ecuación y despejando "L" llegamos a la siguiente expresión:

$$L > \frac{KmKi\rho I_G \sqrt{Ts}}{116 + 0.174Cs(hs, K) \rho_s} \quad (39)$$

De manera similar para $E_m < E_{cont} 70kg$:

$$L > \frac{KmKi\rho I_G \sqrt{Ts}}{157 + 0.235Cs(hs, K) \rho_s} \quad (40)$$

PASO 9.- COMPARACIÓN DEL VOLTAJE DE CONTACTO EN LA MALLA CON EL VOLTAJE DE CONTACTO MAXIMO PERMISIBLE.

Si el voltaje de contacto en malla es menor que el voltaje de contacto tolerable, el diseño estará correcto. Pero si el cálculo del potencial de malla es mayor que el voltaje de contacto permisible, tendrá que modificarse el diseño inicial.

PASO 10.- COMPARACIÓN DE VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO DE LA MALLA CON LOS VOLTAJES MAXIMOS TOLERABLES.

Si los potenciales de malla y de contacto son menores a los potenciales tolerables, el diseño necesitará solamente de conductores adicionales para puesta a tierra de equipos; si no es así, el diseño preliminar debe ser revisado.

PASO 11.- MODIFICACIONES EN EL DISEÑO

Si cualquiera de los límites de voltaje de paso o de contacto son excedidos, se requerirá una revisión en el diseño de la malla.

Esta revisión puede incluir espaciamientos más pequeños entre conductores, adicionar varillas de tierra, etc.

PASO 12.- DETALLES EN EL DISEÑO

Después de satisfacer los requerimientos de los voltajes de paso y de contacto, se pueden requerir conductores y varillas de tierra adicionales; éstos conductores adicionales pueden ser necesarios si el diseño de la red no incluye conductores cerca del equipo que debe ser aterrizado. Las varillas de tierra adicionales pueden ser utilizadas debido a las sobretensiones que pueden ser producidas por ejemplo en la base de los apartarrayos, el neutro de los transformadores, etc.

3.3.- EFECTO DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRA

Pueden presentarse casos en donde la resistencia predicha del sistema de tierras sea muy alta comparada con la reactancia del sistema que obliga a tomarla en cuenta.

Esto implica un problema, pues mientras no esté diseñado el sistema no puede conocerse su resistencia. Sin embargo una vez determinada la resistividad del terreno, la resistencia depende del área del sistema de tierra que normalmente ya se conoce.

La resistencia puede determinarse como:

$$R = \frac{\rho}{4r}$$

ó con mayor precisión :

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

donde :

- R Resistencia del sistema de tierras de la subestación, en ohms.
- ρ Resistividad media del terreno, en ohms-metro.
- r Radio del círculo que tenga la misma área que la ocupada por el sistema de tierra, en metros.
- L Longitud total de los conductores del sistema de tierra, en metros.

Nota: Esta resistencia es una fracción de ohm.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La puesta a tierra de los sistemas una decisión que debe ser considerada por los ingenieros encargados de la protección, control, medición y planeación de los sistemas eléctricos de potencia.

El aterrizamiento generalmente es necesario aunque existen algunas excepciones, en cada caso, se tiene un propósito específico.

La intención de éste capítulo es presentar al ingeniero los fundamentos básicos para la puesta a tierra, así como las prácticas recomendadas y métodos que se emplean.

En sistemas de potencia industriales con cogeneración, las razones para la puesta a tierra de algunos componentes podrían ser las mismas que para equipos similares de compañías suministradoras. Sin embargo, en un sistema industrial, las características individuales de posibles generadores así como, los requerimientos en los procesos de fabricación son situaciones que podrían intervenir en la toma de decisión sobre la puesta a tierra.

4.1.- DEFINICIONES:

➤ SISTEMAS EFECTIVAMENTE ATERRIZADOS.

Se presenta cuando la conexión a tierra se realiza a través de una impedancia muy baja tal que para todas las condiciones del sistema la relación $\frac{V_o}{X_1}$ es positiva y menor que 3 y la relación $\frac{R_o}{X_1}$ es positiva y menor que 1.

➤ SISTEMA ATERRIZADO.

Es donde al menos un conductor (usualmente el punto neutro de los devanados de un transformador o un generador) es intencionalmente aterrizado, sólidamente o a través de una impedancia.

➤ **ATERRIZADO**

Cualquier contacto con tierra o con algún cuerpo conductor que se utilice como tierra, si la conexión es intencional o incluso accidental.

➤ **SISTEMA ATERRIZADO A TRAVÉS DE UNA ALTA RESISTENCIA**

Se utiliza para limitar la corriente de falla a tierra a valores menores o iguales a 10 A y puede fluir la corriente por largos periodos de tiempo sin causar severos daños. Este método se aplica cuando se consigue obtener una relación de $R_o \leq X_{co}$ para limitar los sobrevoltajes transitorios debidos a fallas a tierra con arqueo. R_o es la resistencia de secuencia cero por fase del sistema y X_{co} es la reactancia capacitiva distribuida de fase a tierra del sistema.

➤ **SISTEMA ATERRIZADO A TRAVÉS DE UNA BAJA RESISTENCIA**

Se selecciona la resistencia para limitar la corriente de falla a tierra a valores que sean detectados perfectamente por los esquemas de protección.

➤ **CORRIENTE DE CARGA POR FASE (I_{co})**

Es la corriente de fase para cargar la capacitancia distribuida de fase a tierra del sistema $\frac{V_n}{X_{co}}$.

➤ **REACTANCIA ATERRIZADA**

Puesta a tierra a través de una impedancia donde el elemento principal es la reactancia inductiva.

➤ **RESISTENCIA ATERRIZADA**

Puesta a tierra a través de una impedancia donde el elemento principal es la resistencia.

➤ **RESONANCIA**

Es el aumento en la respuesta de un sistema físico (circuito o sistema eléctrico) a una excitación periódica cuando la frecuencia de excitación (f) es igual a la frecuencia natural del sistema.

En un circuito serie RLC, cuando los parámetros son tales que a la reactancia resultante tiende a cero y la corriente alcanza un valor máximo, entonces el circuito está en resonancia serie, esto sucede cuando:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{o} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Similarmente en un circuito paralelo RLC, la admitancia es mas baja cuando $\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_C}$ y el circuito está en resonancia paralelo.

R_n : Es el valor de la resistencia conectada del neutro del sistema a tierra. Para sistemas aterrizados con una alta resistencia donde R_n es la mayor componente de R_o , se aplica la relación $R_o = 3 R_n$.

➤ SISTEMA SÓLIDAMENTE ATERRIZADO.

Es cuando algún equipo es conectado directamente a tierra sin que sea necesaria una impedancia.

➤ CARGA ESTÁTICA.

Electricidad generada cuando dos cuerpos distintos entran en contacto.

➤ SISTEMA.

Una puesta a tierra consiste de todas las interconexiones a tierra de un sistema de potencia específico y está definido por su aislamiento o separación con sistemas de tierra adyacentes. Esta separación puede estar en función de la conexión en los devanados primarios y secundarios de un transformador que son acoplados sólo por medios magnéticos. La fig. 4.1 ilustra los límites y fronteras de sistemas de tierras.

➤ CORRIENTE DE CARGA DEL SISTEMA:

Es la corriente de carga capacitiva distribuida total de un sistema trifásico ($3 \frac{V_{LN}}{X_{CO}}$).

➤ SISTEMA TRIFÁSICO A CUATRO HILOS.

Es un sistema de suministro de CA que consta de cuatro conductores, tres de los cuáles son conectados a tres fases con tres hilos y el cuarto se conecta al punto neutro del suministro

O al punto medio de una fase en caso de que el secundario del transformador esté conectado en delta y este pueda ser aterrizado.

➤ **SISTEMA TRIFÁSICO A TRES HILOS.**

Es un sistema de suministro de CA que consta de tres conductores, existiendo entre los pares de conductores sucesivos una diferencia de potencial desplazada en fase por una tercera parte del periodo.

➤ **SOBREVOLTAJE TRANSITORIO.**

Sobrevoltaje temporal de corta duración asociado con la operación de un dispositivo de "switchero", una falla, una descarga atmosférica o a fallas a tierra con arco en sistemas flotantes.

➤ **SISTEMA NO ATERRIZADO O FLOTANTE.**

Es un sistema sin una conexión intencional a tierra, excepto a través de transformadores de potencial u otros dispositivos de muy alta impedancia.

4.2.- PROPÓSITOS DE LA PUESTA A TIERRA DEL SISTEMA

La conexión del neutro a tierra es con la finalidad de controlar el voltaje a tierra dentro de los límites predecibles. También se provee para que circule una corriente que permita la detección de una falla a tierra o entre fases.

Las ventajas del control de voltaje a tierra son la reducción del gradiente de potencial aplicado sobre el aislamiento de los conductores y equipo,

además reduce el daño a personas que accidentalmente tocan partes vivas de los conductores.

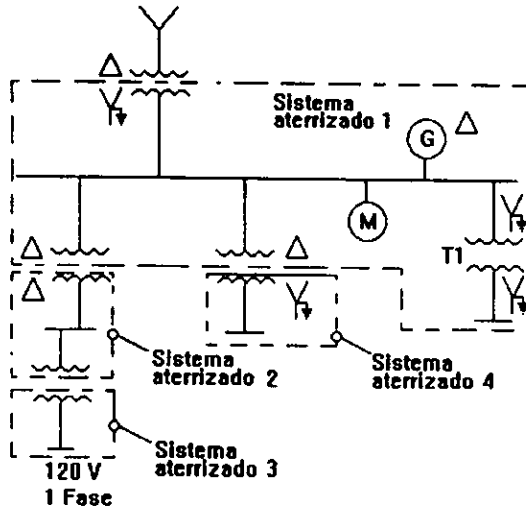


fig.4.1

4.3.-Métodos de puesta a tierra del neutro de los sistemas.

La mayoría de los sistemas aterrizados emplean algún método de aterrizamiento del neutro en uno o más puntos, éstos métodos pueden ser divididos en dos categorías: sólidamente aterrizado y conexión a tierra a través de una impedancia.

El aterrizamiento a través de una impedancia puede ser subdividido en subcategorías:

- a) Puesta a tierra a través de una reactancia.
- b) A través de una resistencia.
- c) Y por medio de un neutralizador de falla a tierra.

La fig. 4.2 muestra los métodos de aterrizamiento. Cada método se nombra de acuerdo a la naturaleza de la conexión a tierra del neutro del sistema.

En cada caso la impedancia del generador o transformador cuyo neutro es aterrizado está en serie con el circuito externo.

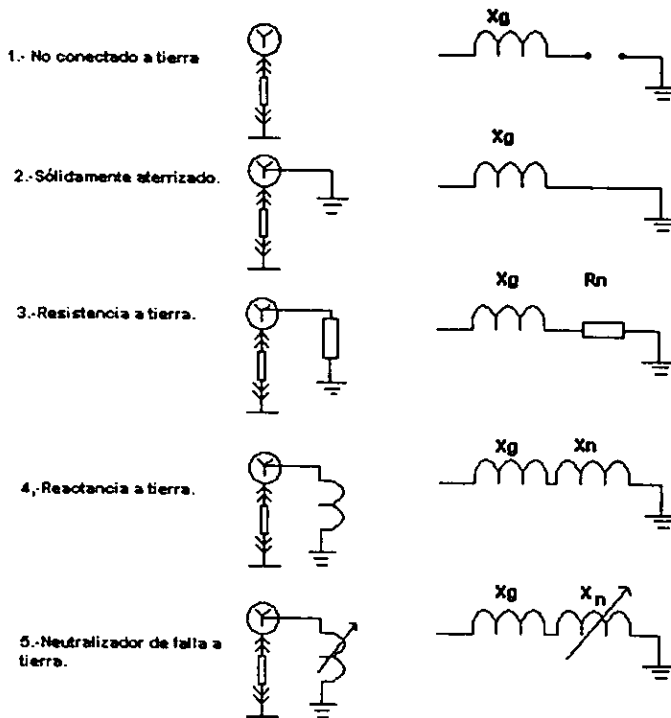


Figura 4.2

X_g Reactancia del generador o transformador usada para conexión a tierra.

X_n Reactancia del reactor para conexión a tierra.

R_n Resistencia del resistor para conexión a tierra.

4.3.1.- SISTEMAS NO ATERORIZADOS O FLOTANTES

En realidad estos sistemas son aterrizados a través de la capacitancia a tierra del sistema, en la mayoría de los sistemas presentan una extremadamente alta impedancia. Dos ventajas principales son atribuibles a los sistemas flotantes.

La primera es operacional: cuando sucede una falla a tierra en el sistema causa sólo una pequeña corriente a tierra y el sistema puede seguir operando, mejorando la continuidad del servicio.

La segunda es económica: no se requiere de gastos para la adquisición del equipo de puesta a tierra o conductores de puesta a tierra.

Numerosas ventajas son atribuidas a los sistemas aterrizados, incluyendo una máxima seguridad, libre de altos sobrevoltajes que pueden ocurrir en sistemas flotantes durante fallas a tierra con arqueo y más fácil la detección y localización de fallas a tierra cuando ellas ocurren. Cabe señalar que efectos resonantes pueden ocurrir cuando la trayectoria de falla a tierra incluye una reactancia inductiva aproximadamente igual a la reactancia capacitiva a tierra del sistema.

Cuando un sistema flotante es seleccionado, un esquema de detección contra fallas a tierra podría ser lo adecuado. Este esquema frecuentemente utiliza tres transformadores de potencial con sus devanados primarios conectados en estrella con neutro aterrizado y los devanados secundarios son usualmente conectados en delta abierta alimentando a un relevador de voltaje el cual envía una indicación y/o alarma cuando ocurre la falla.

4.3.2.-PUESTA A TIERRA A TRAVÉS DE UNA RESISTENCIA

En este método, con los valores de resistencia normalmente usados y excepto para sobrevoltajes transitorios, los voltajes de línea a tierra que existen durante fallas a tierra son cercanos a los que se presentan en los sistemas con neutro flotante.

Un sistema correctamente aterrizado por una resistencia no está sujeto a sobrevoltajes transitorios destructivos. Esto es, para sistemas aterrizados con resistencia en sistemas de 15 KV y menores, tales sobretensiones podrían no ser excesivas si los valores de resistencia caen dentro de los siguientes rangos:

$$R_o \leq X_{co}, R_o \geq 2X_o.$$

Los criterios para limitar la corriente de falla a tierra a través de una resistencia en el neutro podrían ser uno o más de los siguientes puntos:

- 1.- Para reducir el efecto Joule y los efectos de fusión en equipo eléctrico fallado, tales como: interruptores, transformadores, cables y máquinas rotatorias.
- 2.- Para reducir los esfuerzos mecánicos en circuitos y aparatos que conducen la corriente de falla.
- 3.- Para reducir choques eléctricos peligrosos al personal, causados por corrientes de falla a tierra "extraviadas" en la trayectoria de retorno a tierra.
- 4.- Para reducir un posible arco o flameo al personal localizado en las cercanías de la falla a tierra.
- 5.- Para reducir la caída de voltaje momentáneo ocasionado por la ocurrencia y libramiento de una falla a tierra.
- 6.- Control de sobrevoltajes transitorios.

La resistencia de aterrizamiento puede ser de cualquiera de las dos clases, baja o alta resistencia y es determinada por la magnitud de la corriente falla a tierra que permita a fluir.

Aunque no existen normas reconocidas para los niveles de corriente de falla a tierra que definan esas dos clases, en la práctica hay una clara diferencia. La alta resistencia de aterrizamiento se utiliza para limitar la corriente a 10 A o menos, aunque algunos sistemas con voltajes de clase 15 KV podrían permitir corrientes de falla a tierra más altos.

La baja resistencia de aterrizamiento limita la corriente de falla a tierra a niveles de al menos 100 A., siendo el rango más usual de $200 \leq I_{cc} \leq 1000$ A.

Ambos tipos son diseñados para limitar los sobrevoltajes transitorios a niveles seguros (dentro de 2.5 P.U), sin embargo, el método de alta resistencia usualmente no requiere el libramiento de falla a tierra inmediato ya que la corriente de falla a tierra es limitada a niveles muy bajos.

Puede ser aplicado a sistemas flotantes de media tensión que tienen la protección contra sobretensiones transitorias sin la modificación cara de agregar relevadores contra fallas a tierra en cada circuito.

El método de aterrizamiento con baja resistencia tiene la ventaja de un inmediato y selectivo libramiento del circuito fallado, pero requiere que la mínima corriente de falla a tierra sea lo suficiente para que opere el relevador contra falla a tierra.

4.3.3.- CONEXIÓN A TIERRA A TRAVÉS DE UNA REACTANCIA

Se determina el valor de la reactancia para que la corriente de falla a tierra sea de al menos el 25% y preferentemente el 60% de la corriente de corto circuito trifásico para evitar altos sobrevoltajes transitorios ($X_0 \leq 10X_1$). Éste es un valor considerablemente mayor que el nivel de corriente de falla deseable en un sistema aterrizado por medio de resistencias.

En la mayoría de los generadores sólidamente aterrizados podría ocurrir que la corriente máxima de falla a tierra exceda la corriente de falla trifásica que el generador pueda entregar por lo cual sus devanados son reforzados. Consecuentemente generadores con neutro aterrizado podrán conectarse a tierra a través de un reactor de bajo valor que pueda limitar la corriente de falla a tierra a valores menores que la corriente trifásica.

En el caso de sistemas trifásicos a cuatro hilos la limitación de la corriente de falla a tierra al 100% de la corriente de falla trifásica es usualmente práctico.

4.3.4.- NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA (aterrizamiento resonante)

El neutralizador de falla a tierra es un reactor conectado entre el neutro del sistema y tierra con un valor relativamente alto de reactancia. La corriente de falla es resistiva y de baja magnitud, esta corriente esta en fase con el voltaje de línea a neutro para que el cruce por cero de la corriente y el voltaje ocurran simultáneamente, si la falla a tierra es en aire tal como una descarga en un aislador, ésta puede ser autoextinguida.

Este método se utiliza en sistemas arriba de 15 KV que tienen líneas de transmisión aéreas largas o líneas de distribución, estas características son raramente usadas en sistemas de potencia industriales y comerciales por lo que este método tiene pequeña aplicación en estos sistemas.

4.3.5.- SISTEMAS SÓLIDAMENTE ATERORIZADOS

Sólidamente aterrizado se refiere a la conexión del neutro de un generador, o transformador de potencia directamente a la red de tierras de la subestación.

Por causa de la reactancia del generador o transformador que está en serie con el circuito neutro, una conexión sólidamente aterrizada no provee un circuito neutro de impedancia igual a cero.

Si la reactancia de secuencia cero del sistema es también grande con respecto a la reactancia de secuencia positiva del sistema, los objetivos buscados con el aterrizamiento, principalmente que quede libre de sobretensiones transitorias podría no ser alcanzado, esto prácticamente no sucede en sistemas de potencia industriales y comerciales, la impedancia de secuencia cero de la mayoría de los generadores utilizados en estos sistemas es mucho más baja que la impedancia de secuencia positiva de los mismos.

Para cuantificar los beneficios del aterrizamiento sólido, es necesario determinar el grado de aterrizamiento provisto al sistema.

Una buena guía es comparando la magnitud de la corriente falla a tierra con la corriente de falla trifásica, entre mayor sea esta relación menor es el grado de aterrizamiento del sistema. Sistemas aterrizados efectivamente podrían tener una corriente de cortocircuito a tierra de al menos el 60% de la trifásica.

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5

5.1 CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO ELECTRÓNICO

Principalmente son cuatro los problemas que tienen que ver con la conexión a tierra del equipo electrónico y la calidad de la energía:

- a) Transitorios
- b) Armónicas
- c) Ruido
- d) Carga estática generada por fricción

Los componentes de una computadora llegan a ser más complejos y sensibles a bajos voltajes, lo cual indica que los voltajes transitorios son dañinos a los dispositivos de estado sólido. El bajo voltaje de operación de las computadoras y de los equipos electrónicos sensibles se hace susceptible en presencia de voltajes repentinos de gran magnitud.

Otro problema es el de las corrientes armónicas que son producidas por cargas no lineales debido principalmente al auge de la electrónica de potencia para aumentar la productividad de los procesos industriales. Sin embargo, dicha distorsión incluso afecta al mismo sistema que las produce.

El tercer problema de consideración es el ruido. Este se presenta como una señal no deseada que se introduce por el modo común o en modo normal al equipo sensible, y que puede causar problemas tan severos como errores en las bases de datos.

Y por último también consideramos la carga estática generada debido a la fricción al caminar sobre piso falso.

Mucho se ha aprendido - no en como eliminar esas fuentes de interferencia, pero sí el cómo prevenir su entrada a los sistemas con equipo electrónico sensible.

La perfecta conexión a tierra idealmente presentaría una resistencia cero, pero, como sabemos esto es imposible de obtener.

Para grandes subestaciones y plantas generadoras, la resistencia a tierra se recomienda que no exceda a 1 ohm.

Para pequeñas subestaciones se deberán tener resistencias menores a 5 ohms. Sin embargo, si tenemos un correcto aterrizamiento del equipo, no necesitamos procurar un valor irrealista tan bajo de resistencia a tierra, como es el popular valor de 1 ohm, ya que las conexiones a la malla son principalmente por seguridad eléctrica, obteniendo bajos gradientes de potencial en los equipos.

Cuando uno revisa la relación de la impedancia de tierra en la figura (5.2)

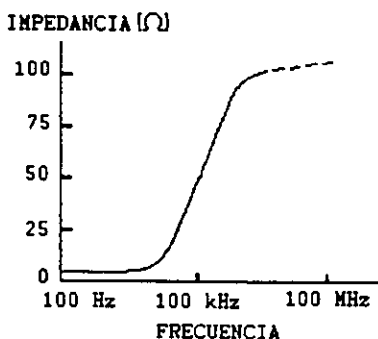


FIGURA (5.2)

vemos que con el incremento de la frecuencia arriba de pocas decenas de kilohertz, la impedancia del conductor neutro y el de tierra irán aumentando considerablemente y será más grande que para los sistemas que trabajen con corriente directa y también para los sistemas que operen a 60 Hz.

De la figura (5.2) podemos observar que la impedancia típica del conductor de aterrizamiento se incrementa linealmente en función de la frecuencia, debido a esto, resulta frustrante diseñar una malla con baja impedancia de tierra si tenemos equipo que opera a alta frecuencia.

5.2 SUBSISTEMAS DE TIERRA

Consideraremos a la malla de la subestación como el sistema de tierras principal, al de referencia, protección del personal y el de pararrayos como 3 distintos subsistemas funcionales que pueden o no según su distancia entre ellos estar sólidamente conectados entre si.

5.2.1 SISTEMAS DE REFERENCIA A TIERRA PARA SEÑALES DE EQUIPO SENSIBLE

Estos sistemas son indispensables para obtener la calidad de la energía necesaria para que, los equipos sensibles operen lo más eficientemente posible, sus funciones principales son:

- Proporcionar una buena referencia a tierra para alta frecuencia.
- Para drenar carga electrostática formada por fricción al caminar sobre el piso falso de la sala de equipo sensible.
- Mantiene libre de ruido el voltaje de las UPS que alimentan al transformador de aislamiento que abastece las computadoras.
- Para referenciar los filtros de ruido y de armónicas.

Tomamos por regla general que todos los equipos sensitivos que se encuentran en zonas contiguas, se deben referenciar a una estructura. Dicha estructura se debe construir en forma de una red para referencia de señales, bajo el piso falso que sostiene al equipo de cómputo, con tiras de cobre aplanadas o bien con cable de cobre desnudo por lo regular de calibre 4 a 6 AWG.

A excepción de las tiras, éstos conductores pueden tener un efecto de autoresonancia elevado, provocado por las corrientes armónicas de alta frecuencia.

La figura (5.3) nos muestra este efecto en un conductor de calibre 4 AWG.

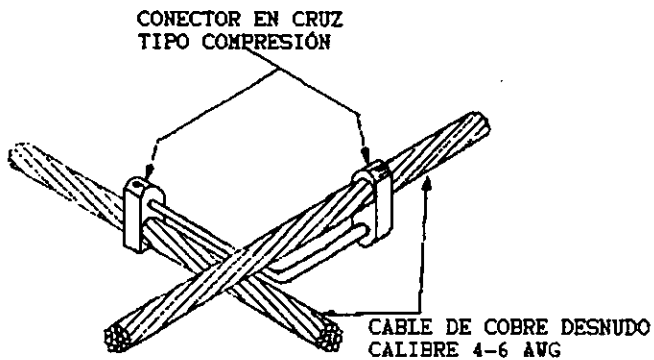


FIGURA 5.3(a)

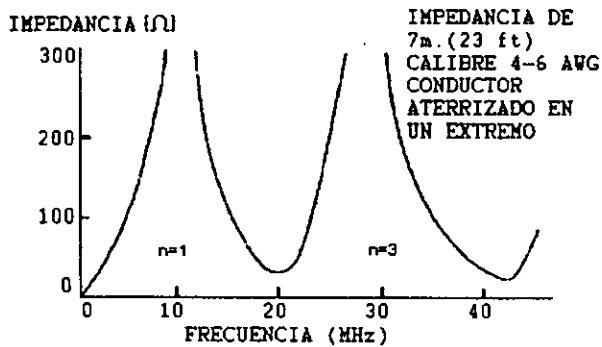


FIGURA 5.3(b)

Si por eventualidad de las condiciones en el sitio de instalación de la red se tuviera que la longitud del conductor fuera igual a un múltiplo de un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia de resonancia entonces, la reactancia inductiva del conductor aumentará indefinidamente, esto es:

$$L = \frac{c * n}{4 * f_{resonancia}}$$

$L_{\text{resonancia}}$ = longitud del conductor resonante (m)

n = cualquier entero impar

c = velocidad de la luz en el espacio libre ($3 \cdot 10^8$ m/s)

f = frecuencia de resonancia del conductor.

Una malla para referencia se hace atornillando y acordonando la estructura subterránea de los pisos falsos; el conductor se une a una distancia de 0.6096 m (2 ft). VER FIG. (5.4)

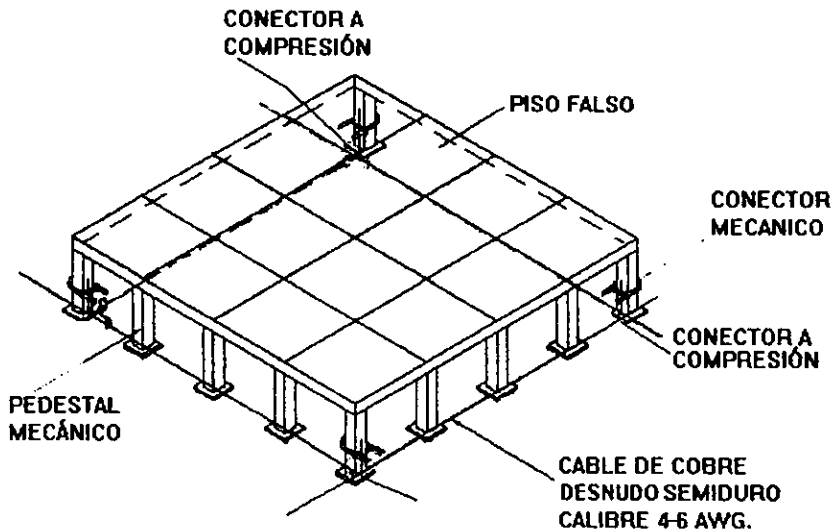


FIGURA (5.4)

La reactancia inductiva de los conductores es generalmente baja entre más cortos se tengan los espacios de la malla.

Los tornillos que conectan los alambres en cada pedestal se deben mantener apretados y libres de corrosión.

No es recomendable usar sólo el pedestal del piso falso (sin malla) para referencia del equipo.

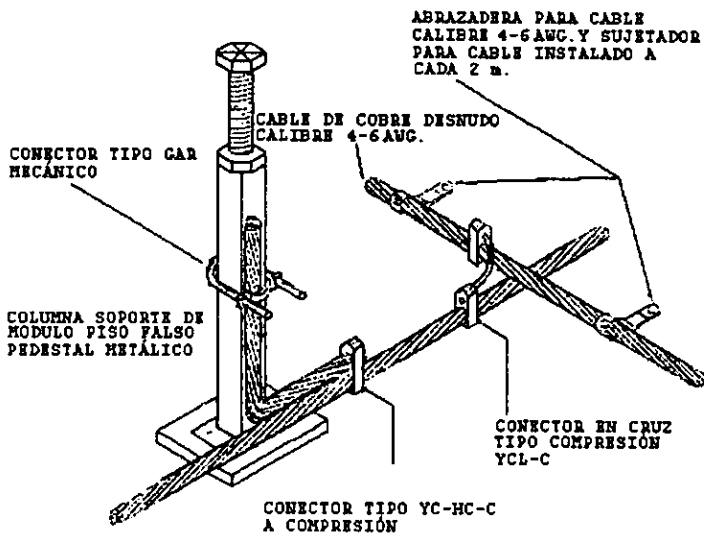
Dos conductores de puesta a tierra de diferente longitud conectados a cada pieza del equipo reducen substancialmente la impedancia de dichas tiras ya que se tienen dos trayectorias posibles para el ruido de alta frecuencia.

Los requerimientos de seguridad establecen que la malla de referencia debe estar conectada a una tierra física apropiada. El no realizarlo trae como consecuencia prácticas de diseño deficientes.

También se requiere que todos los objetos metálicos que cruzan la malla de referencia sean conectados a la misma, ésta recomendación incluye todo el metal del inmueble, así como otras trayectorias metálicas conductoras que estén a 1.8288 m (6 ft) de la malla de referencia.

En construcciones nuevas, las varillas embebidas en concreto deben ser conectadas a la malla de referencia. El material del piso falso debe ser antifiama y no deberá pasar de 30 cm sobre el nivel de piso terminado.

FIGURA (5.5)



5.2.2 RESUMEN DE LAS RECOMENDACIONES PARA LAS MALLAS DE REFERENCIA Y SU INSTALACIÓN

1. Seguir los códigos y estándares aplicables para una conexión a tierra segura.
2. Seleccionar un método adecuado para la instalación de la malla de referencia, de tal manera que asegure el mantenimiento en forma correcta.
3. Conectar de manera permanente la malla de referencia a todas las estructuras metálicas del inmueble a las que tenga acceso dentro de una distancia de 1.8288m (6 ft).
4. Unir la malla de referencia a cada pieza del equipo sensible.
5. Las conexiones de unión a la malla de referencia deben ser tan cortas como sea posible, evitando pliegues afilados.
6. Si se usa más de un conductor de unión a tierra, estos deben ser conectados en partes distintas o separadas del equipo conectado y a pedestales o puntos separados en la malla de referencia.
7. Todos los tableros derivados localizados dentro de la sala de equipo electrónico que den servicio a equipos localizados en la malla de referencia (incluyendo tableros de alumbrado), deben tener su propio punto de conexión a tierra conectado a la malla de piso falso.
8. Todos los equipos de enfriamiento, calefacción, ventilación y aire acondicionado, así como tuberías, tapas metálicas, tableros, interruptores, transformadores y equipo similar dentro del área protegida, deben estar conectados a la malla de referencia.

9. No se deben hacer conexiones a puntos de tierra remotos o dedicados ni hacer cualquier intento similar con trayectorias de conexión a tierra separadas.

10. Todos los cables de datos y de potencia deben quedar encima o lo más cerca posible a la malla de referencia.

11. La documentación debe estar completa en todos los detalles, incluyendo la adecuada conexión a tierra de los equipos de aire acondicionado, calefacción, ventilación, tuberías, charolas y artículos similares.

Los conductores en forma de cintas lisas y delgadas es lo que se recomienda en la práctica para la referencia a tierra, con el objeto de (al ser menor la sección transversal del conductor), reducir el efecto "piel" que presenta un conductor de puesta a tierra con sección transversal circular.

La pintura o cualquier otro inhibidor de contacto con la superficie debe ser removido antes de sujetar las tiras; dichas cintas deben ser tan cortas como sea posible con el fin de minimizar aún más la inductancia.

Se debe utilizar charolas o tubos metálicos para llevar los cables de potencia o de señales entre áreas distintas con uso intensivo de equipo sensible.

Estas charolas deben ser conectadas a tierra en ambos extremos y también en varios puntos a lo largo de su trayectoria.

Es importante que el conductor que realiza la conexión entre los equipos de comunicaciones, cómputo o de cualquier sistema eléctrico que se encuentre en las proximidades de los equipos sensibles y que sirva para mantener al mismo potencial estos equipos, así como, su respectivo conductor de puesta a tierra sean de baja impedancia para su seguridad. Esta recomendación es independiente de que se tenga una malla de piso falso.

PLANO EQUIPOTENCIAL O VENTANA DE TIERRA: Se sabe que cuando se tienen conductores de tierra largos tanto en sistemas de un sólo punto como en sistemas multipunto, exhiben impedancias más grandes a frecuencias más altas, por lo tanto, los subsistemas para referenciar señales requieren la₆₁

existencia de una estructura que logre los beneficios de un plano de tierra equipotencial para acoplar la impedancia en todo el intervalo de frecuencias de interés como se muestra en la figura (5.6):

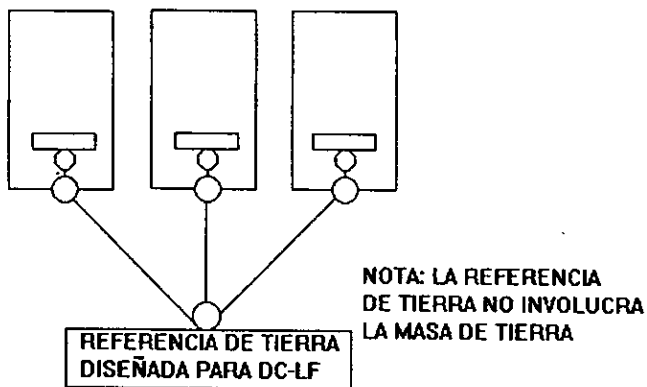


FIGURA (5.6)

Al instalar una "ventana" de tierra en este tipo de sistemas se logra una impedancia baja para grandes rangos de frecuencia.

Este plano asegura que no existan variaciones de voltaje entre los circuitos de señales y el equipo interconectado.

VENTAJAS DE UN PLANO EQUIPOTENCIAL:

- ◆ Proporcionar un camino de retorno de baja impedancia para las corrientes de ruido.

- ◆ Protege a los circuitos o equipo sensibles adyacentes a esta de diferencias de potencial.

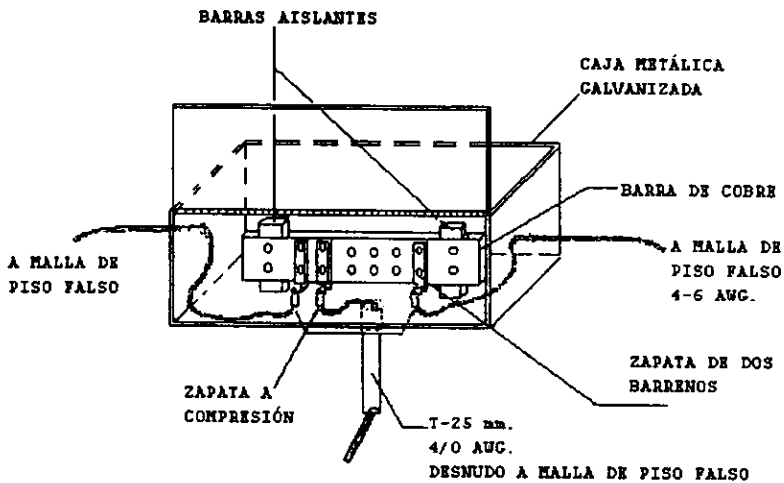


FIGURA (5.7)

POSIBLES PLANOS EQUIPOTENCIALES:

1. Red conductora empotrada en concreto.
2. Pantalla metálica u hoja de metal bajo el piso falso, o instalada en un closet eléctrico dentro de una caja metálica galvanizada.
3. Red de soporte en los pedestales del piso de acceso elevado.

Dentro de los gabinetes de los equipos sensibles, todos los componentes relacionados, como: varistores, conductores para el retorno de señales, etc., deben ser conectados por conductores lo más cortos posibles al plano equipotencial instalado.

Así cuando aparece una sobretensión en algún alimentador en el caso muy remoto de que no operaran los dispositivos de protección contra sobretensiones (varistores y relevadores), en la ventana de tierra se eleva el potencial, pero esto es para todos los cables y equipos referenciados a tierra; por lo tanto no hay problema.

Lo más aconsejable es que el plano equipotencial se instale dentro del área del equipo electrónico sensible (un cuarto eléctrico), éste a su vez deberá ser conectado a otro plano equipotencial con otros equipos electrónicos para posteriormente conectarse a la red de tierra local de la subestación.

Este proceso continúa hasta que todo el equipo electrónico sensible de interés esté interconectado a un plano equipotencial grande y continuo, o bien a la red principal de tierras, como se muestra en la figura (5.8)

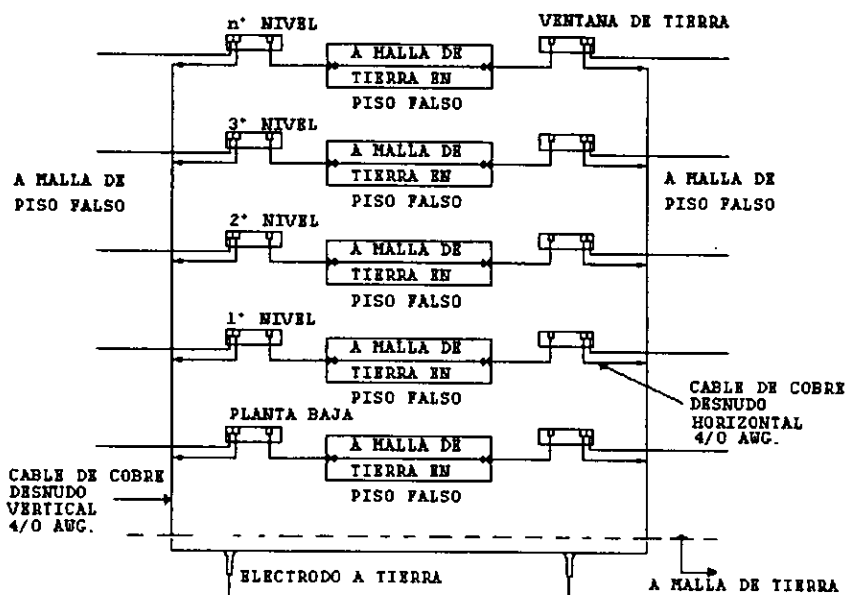


FIGURA (5.8).

5.2.3 SUBSISTEMA PARA PROTECCIÓN PERSONAL.

Estas establecen la referencia a tierra de algún operador para protegerlo de alguna descarga que pueda ser mortal (en baja tensión), o para evitar el riesgo de fuego producido por algún arco eléctrico, y riesgos de choque eléctrico manteniendo en cero las diferencias de potencial, interconectando todas las partes metálicas de donde se efectúa la instalación.

Tienen como fin el brindar una mayor protección, y sólo se utiliza para conectar a tierra los equipos como carcazas y tubos con el propósito principal de la seguridad. Sin embargo, es preferible que no sean referenciados directamente los equipos electrónicos a este subsistema.

La configuración para la conexión a tierra del sistema de protección personal contra fallas se muestra esquemáticamente en la figura (5.9):

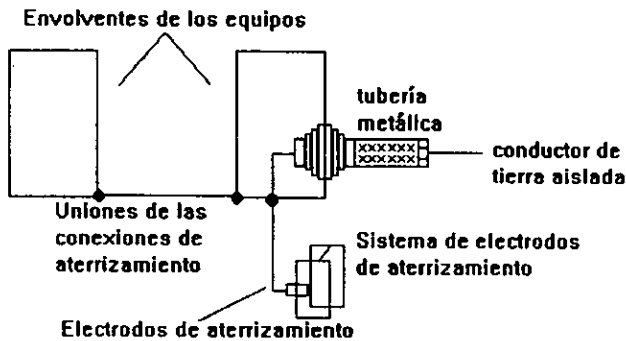


FIGURA (5.9)

5.2.4 SUBSISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Un sobrevoltaje transitorio puede dañar las tarjetas (motherboard) de las computadoras, estos voltajes pueden ser la onda viajera de algún rayo que se introduce al sistema eléctrico. Sin embargo, pueden existir otras causas de transitorios.

El sólo propósito del subsistema de protección de pararrayos es el transporte seguro de las corrientes relacionadas con las descargas atmosféricas a través de la instalación y hasta la red de tierra de la subestación. Esto se lleva a cabo proporcionando trayectorias en el techo de la construcción para dirigir las corrientes de las descargas atmosféricas hacia su red de tierra. Esta red se instala para evitar daños directos, como incendios, lesiones o muerte, o bien daños indirectos como interrupción de servicios, producción, etc. Para techos horizontales se recomienda que la distancia entre puntas de 30 cm sea menor o igual a 6m, y para puntas hasta de 60 cm o más sea menor o igual a 7.6 m.

5.3 CONEXIÓN A TIERRA DE CANALIZACIONES Y ACCESORIOS

Todos los objetos metálicos, principalmente los que encierran conductores o que probablemente puedan ser energizados por corrientes eléctricas deben ser conectados efectivamente a tierra por las siguientes razones:

- Proporcionar seguridad al personal.
- Reducir el riesgo de incendio.
- Por protección propia y comportamiento del equipo.

Al conectar sólidamente a tierra estos objetos metálicos, se facilitará la operación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente (falla a tierra), y permitirá el retorno de las corrientes. Se recomienda conectar a tierra la estructura de acero del inmueble. Donde sea accesible, todo el acero estructural debe ser conectado o unido a tierra para formar una masa única eléctricamente conductiva.

La estructura de acero del inmueble debe ser conectado a tierra por uno o más de los medios siguientes:

1. Por un conductor no menor al calibre 2 AWG como mínimo y con soldadura "cadweld".
2. Por enterramiento directo o por el electrodo de acero de la estructura del inmueble empotrado en concreto en las patas de los cimientos.
4. Por sistemas de electrodos en anillo enterrado y puentes de conexión a tierra.

5.3 CONEXIÓN A TIERRA DE EQUIPO MECÁNICO QUE PUEDA AFECTAR AL EQUIPO SENSIBLE DE UN INMUEBLE

Al realizar una instalación eléctrica esta debe ser coordinada con las instalaciones hidráulica, sanitaria, comunicaciones, aire acondicionado etc.

Equipos como el aire acondicionado afectan los equipos eléctricos y de comunicaciones introduciendo ruido transitorio e incluso la posibilidad de alguna falla eléctrica a estos sistemas; es por esto que todos los equipos mecánicos en las áreas de equipos electrónicos deben ser conectados a tierra en forma efectiva por seguridad eléctrica, para protección contra descargas atmosféricas y para el control de ruido. Tal equipo (incluyendo la estructura, chasis, tuberías, ductos, conduits, charolas eléctricas) deben ser conectados a tierra o deben ser unidos a la estructura de acero del inmueble usando medios de conexión a tierra o uniones que no presenten un efecto en la reactancia inductiva.

Cuando se localizan en la misma área que el equipo electrónico sensible, el equipo mecánico debe ser unido a la misma referencia de tierra de (HF) que el equipo electrónico sensible. Se recomienda que los equipos de calefacción, ventilación, aire acondicionado, y equipo de enfriamiento del proceso, tuberías de metal y conductores eléctricos relacionados, sean unidos al acero de la estructura local de referencia de señales donde se encuentra instalado el equipo electrónico.

5.5 CONEXIÓN A TIERRA DE BLINDAJES

Generalmente el conduit metálico rígido es utilizado para canalizar los cables de señales, el conduit metálico actúa como un blindaje. Este blindaje se recomienda su conexión a tierra en varios puntos (por lo general en ambos extremos). Los conduits son aterrizados de acuerdo a la frecuencia de operación de los cables que canalice:

- Bajas frecuencias en un solo extremo
- Altas frecuencias en múltiples puntos

La inducción electrostática en los cables de comunicaciones que transportan bajos niveles de voltaje puede ser eliminada mediante su pantalla.

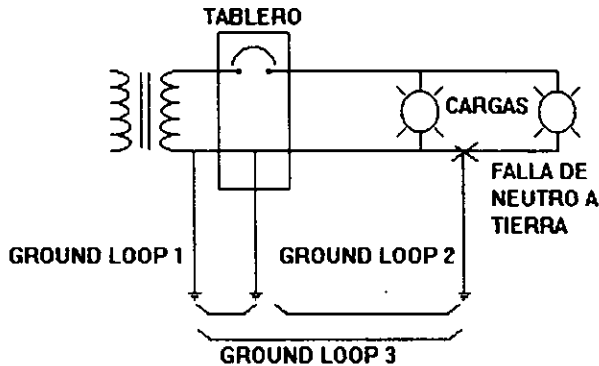
Según el tipo de cable estas pantallas pueden ser:

- 1.- Cable encintado de cobre
- 2.- Forro metalizado con un cable de cobre para el drenado
- 3.- Malla de aluminio
- 4.- Si el cable es UTP (par retorcido), y no tiene pantalla, entonces un conduit metálico servirá de pantalla (si es de acero, también sirve como blindaje magnético).

Para frecuencias hasta de 1 MHz, una buena práctica es aterrizar el blindaje en un solo extremo, preferentemente en el extremo de la fuente de la señal esto es para prevenir la existencia de una diferencia de voltaje en los extremos.

5.6 RUIDO DE TIERRA EN LA ENTRADA DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO

Si el conductor neutro del sistema es conectado a tierra en varios puntos, en forma intencional o no, el regreso de la corriente al neutro fluirá descontroladamente por el sistema de tierra. Este flujo de corriente descontrolado por el sistema, es conocido como ruido en modo común.



MULTIPLES RUTAS DE LA CORRIENTE DEL NEUTRO A TIERRA

figura (5.10)

5.7 MÉTODO DE CONEXIÓN SEPARADO DEL SISTEMA DE TIERRA

Comúnmente se encuentra la conexión separada del sistema de tierra en los equipos electrónicos y se utiliza como un medio posible para reducir el ruido eléctrico que se puede introducir en los circuitos sensibles debido a la presencia de carga electrostática; esto no se recomienda en lugares donde ésta es muy grande.

Definitivamente no es recomendable la conexión a tierra del circuito con un solo electrodo y en un sólo punto ya que no es práctico desde el punto de vista de ingeniería debido a que la instalación de un electrodo de tierra separado del sistema de tierra favorece la existencia de diferencias de potencial peligrosas entre el electrodo y el sistema de tierra (cuando existe una falla a tierra en uno de los equipos), arriesgando tanto al personal, como a los propios equipos (esto también puede ocurrir cuando se tienen distintos sistemas, para pararrayos, para equipo electrónico y de potencia y estos no están interconectados).

Una descarga atmosférica puede crear condiciones de varios kilovoltios entre dos ó más de dichos electrodos o sistemas de tierra. Al igual, las fallas a tierra en los sistemas de C.A. pueden crear problemas similares.

5.8 CONEXIÓN A TIERRA EN RECEPTÁCULOS, Y ACCESORIOS QUE ALIMENTAN VOLTAJE REGULADO

Generalmente en la práctica, la "chalupa" o caja de los contactos es conectada a tierra con un conductor desnudo calibre 12 AWG, sin embargo, el conductor se elegirá de acuerdo a la capacidad del circuito de protección según la tabla 290-95 de la NOM-001-SEMP-1994; debemos señalar que todos los contactos no polarizados se consideran circuitos no conectados a tierra.

Se recomienda que la conexión a tierra de la fuente de C.A. y su contacto polarizado relacionado, se realice como lo muestra la figura (5.11):

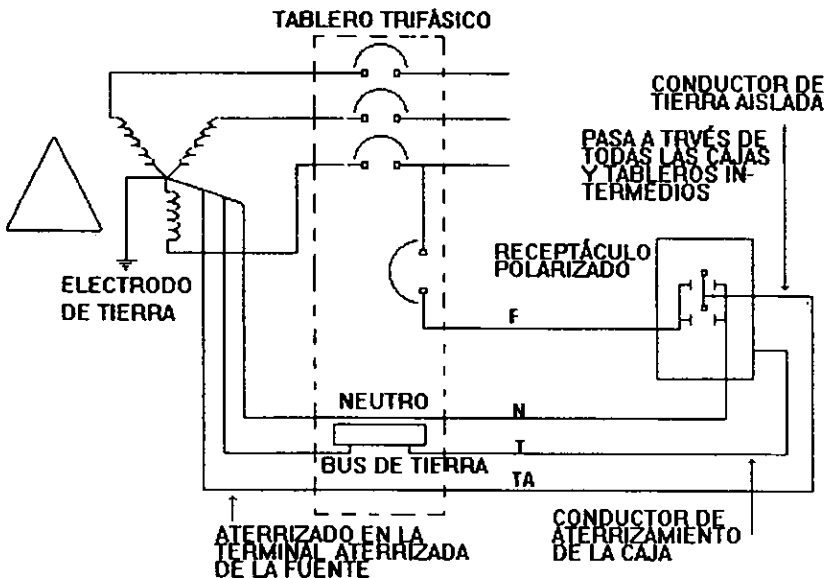


FIGURA (5.11)

Un receptáculo polarizado que sirva para alimentar equipo sensible es de color naranja, o bien, llevan estampados permanentemente un triángulo del mismo color, estos contactos alimentan con voltaje regulado desde el sistema de UPS a las computadoras y son conectados a tierra con un conductor aislado color verde típicamente del 12 AWG al 6 AWG, (según la capacidad del dispositivo de protección), a través del neutro del transformador de aislamiento. Fig. (5.12)

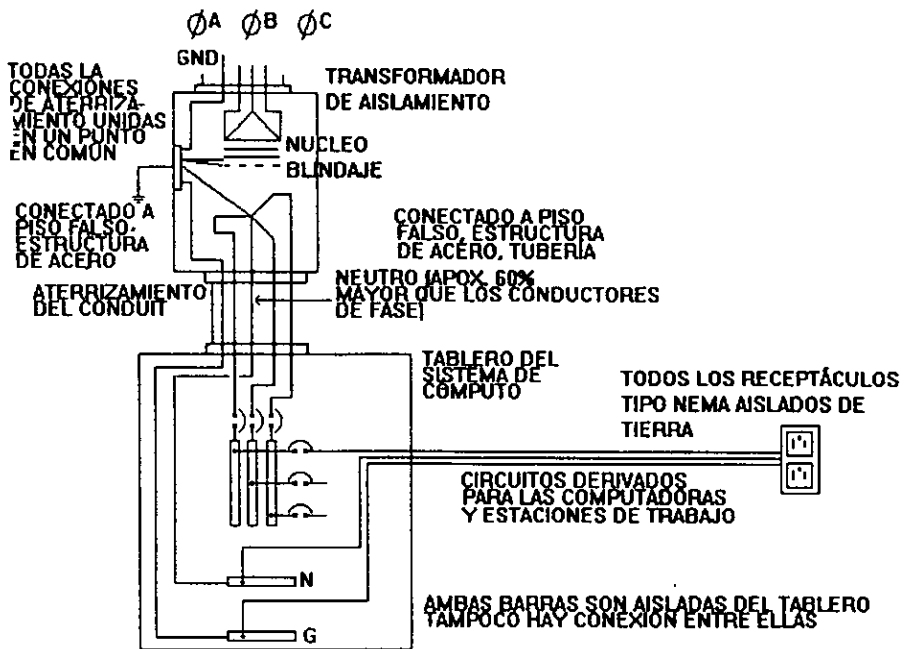


FIGURA (5.12)

Algunos contactos polarizados tienen integrados un supresor de transitorios y llagan a suprimir un pico de corriente hasta de 13 kA. con un tiempo de respuesta de 5 ns. Aproximadamente.

Cabe mencionar que las modernas UPS tienen integrado un transformador de aislamiento, varistores e incluso filtros conectados entre fases para suprimir los transitorios, directamente desde la entrada del servicio.

Los circuitos que emplean conductores con aislamiento color verde, deben tener su charola o ducto metálico prominente y permanentemente identificado como un conductor de tierra aislado. Esta identificación puede hacerse también etiquetando con un triángulo color naranja o pintando ambos extremos del circuito con un color naranja.

La interfaz recomendada para el arreglo de un sistema de C.A. sólidamente interconectado (con carga electrónica sensible) es un transformador de aislamiento localmente instalado y referido como en la figura (5.13):

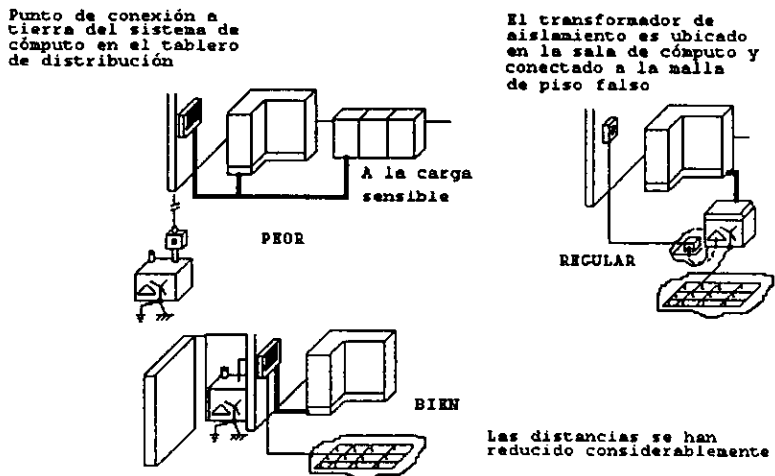


FIGURA (5.13)

PEOR: La conexión a tierra de la carga sensible esta muy separada de la conexión a tierra del transformador de aislamiento, por lo tanto están sujetas a ruido y a diferencias de potencial entre ellos.

REGULAR: El transformador de aislamiento y el equipo de cómputo es conectado a tierra en el mismo punto y con un interruptor general.

BIEN: El transformador de aislamiento se encuentra en el closet localizado dentro de la sala de cómputo; por lo que se ha decrementado en gran medida la separación de los puntos de aterrizamiento, y realizándose en forma más correcta a través de su tablero derivado.

5.9 CONEXIÓN A TIERRA DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

El cable troncal del cuadro de distribución principal su pantalla exterior y los varistores asociados deben ser conectados al piso falso de la malla de referencia. Sólo en el extremo del gabinete del equipo de comunicaciones una de las terminaciones del cable de antena comunitaria de televisión (CATV) debe ser conectados a tierra en la pantalla. Actualmente para la transmisión de datos es común usar fibra óptica; sin embargo, esto es muy costoso para grandes circuitos de comunicaciones, por esto también, podemos encontrar cables coaxiales con pantalla (CATV) o cables de par retorcido también con o sin pantalla, estos deberán unirse a la tierra para equipo sensible a través de la pantalla en el extremo más próximo al equipo sensible de medición, FIGURA (5.14).

La interferencia electrostática es mayor en un medio ambiente de alto voltaje; este tipo de interferencia puede ser reducida instalando una pantalla electrostática. Si la pantalla no es de buena manufactura o no está bien conectada a tierra el conductor de alto voltaje inducirá un voltaje en el conductor de la señal.

Debemos recalcar que las tierras de las pantallas no son tierras para seguridad si la pantalla entra en contacto con una línea con voltaje de alimentación y no está propiamente conectada a tierra se presenta una situación peligrosa, ya que la pantalla ahora llevaría el voltaje "vivo", y como la capacidad de llevar corriente de las pantallas es generalmente baja se presenta un alto riesgo de incendio.

La efectividad de la pantalla es dependiente de la frecuencia, esto es, una pantalla que es 95% efectiva a 1 MHz, puede que solo sea 15% efectiva a 200 MHz (ya que presenta una gran reactancia inductiva a altas frecuencias).

También la efectividad de la pantalla varía con la construcción del cable y de la pantalla misma (según marca y tipo de cable).

El uso de conductores de tierra desnudos en canalizaciones metálicas que alimenten estos equipos, de ninguna manera es recomendable, estos solo se deben usar para conectar el tubo conduit a tierra y además deben ser cortos por los motivos ya explicados.

Nuestra recomendación es que solo el alambre aislado; del receptáculo polarizado debe ser llevado a través de una canalización metálica.

La conducción de los conductores desnudos dentro de un conducto o charola metálica puede provocar dos condiciones no deseadas:

1. Arqueos destructivos localizados entre el conductor desnudo y los conduits o charolas metálicas, a lo largo de la trayectoria del conductor desnudo, esto durante una falla a tierra o en condiciones de sobrevoltaje transitorios que pueden dañar los conductores aislados.

2. La generación de niveles bajos de ruido eléctrico de alta frecuencia debido al contacto intermitente con la canalización metálica.

5.10 DISPOSITIVOS COMUNMENTE UTILIZADOS PARA MEJORAR LA ENERGÍA Y QUE DEBEN SER REFERENCIADOS A TIERRA

5.10.1 FILTROS

Para evitar el ruido se pueden tomar los siguientes puntos a consideración:

1.-Uso de un solo punto de puesta a tierra para eliminar circuitos cerrados ver figura (5.14).

2.- Instrumentos de medición aislados de la conexión a tierra de los equipos de potencia a través de pantallas, transformadores de aislamiento, UPS montados sobre superficies aislantes.

3.-Instalar los cables coaxiales perpendicularmente a los cables que transporten corriente, para evitar inducciones en toda su longitud.

El ruido electrostático y electromagnético se puede reducir tomando las medidas siguientes:

- 1) Asegurar la integridad de los cables coaxiales.
- 2) Tender los cables extendidos y cerca de superficies aterrizadas.
- 3) Colocar los instrumentos en un recinto tipo jaula de Faraday.
- 4) Usar transmisión de señales con fibra óptica.
- 5) Las trayectorias de los cables deben ser lo mas cortas posibles.

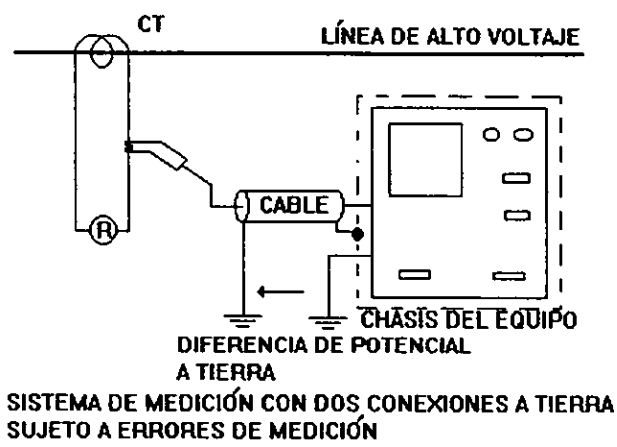
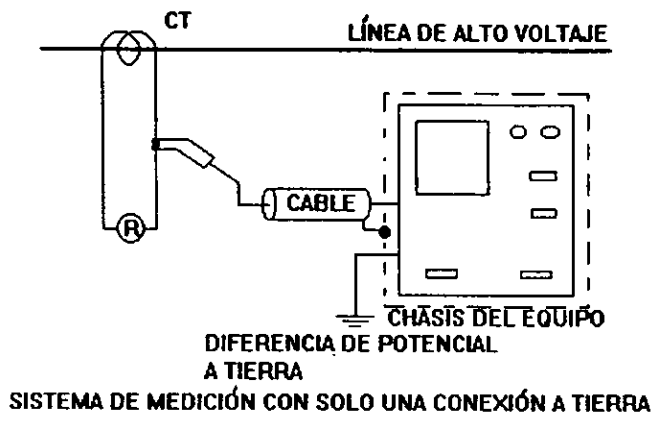


FIGURA (5.14)

El ruido introducido en el sistema de transmisión de señales afecta la precisión de la medición. Los cables de transmisión de señales a menudo pasan por el patio de una subestación de alto voltaje donde el ruido en el medio ambiente es muy severo.

Sin embargo, un medio mucho más eficaz para controlar el ruido son los filtros llamados, "filtros en línea" tienen la función de reducir la interferencia electromagnética y la interferencia por radio frecuencia. La figura(5.15) muestra una representación de un tipo de filtro LC

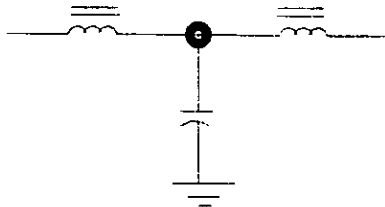


FIGURA (5.15)

5.10.2 FILTROS CONTRA RUIDO

Los filtros se pueden usar para prevenir interferencia de ondas viajeras que van hacia el equipo y que vienen de la entrada del servicio de energía, así como también previene de la interferencia que genera el equipo hacia la fuente de energía. La mayoría de los equipos electrónicos tienen alguna forma de filtro para limitar el ruido de alta frecuencia. La forma más simple de estos filtros es un filtro paso baja diseñado de tal manera que deje pasar el voltaje a 60 Hz y bloquee las frecuencias altas. Estos dispositivos contienen inductores serie seguidos de capacitores conectados a tierra.

El inductor forma una trayectoria de baja impedancia para la potencia de la compañía suministradora a 60 Hz, pero una trayectoria de muy alta impedancia para el ruido de alta frecuencia(ya que: $X_L=2\pi fL$). El capacitor conduce el ruido de alta frecuencia restante a tierra antes de que alcance la carga.

Estos filtros no son efectivos para frecuencias cerca de 60 Hz, tales como las de las armónicas de bajo orden.

Los filtros pueden conectarse entre fases o de fase a neutro, también se pueden conectar entre fase y neutro, entre fase y tierra.

5.10.3 FILTROS DE CORRIENTES ARMÓNICAS

Las armónicas como se dijo anteriormente son producidas por cargas no lineales, por ejemplo, balastos electrónicos, equipos de soldadura, hornos de arco eléctrico, sistemas ininterrumpibles de potencia (UPS), equipos de computo, rectificadores y variadores de velocidad. Originando los siguientes efectos negativos en la red eléctrica:

- SOBRECALENTAMIENTO Y POR CONSECUENCIA DAÑO AL AISLAMIENTO DE CONDUCTORES Y TRANSFORMADORES.
- INCREMENTO EN LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA.
- DAÑOS A EQUIPOS SENSIBLES DEBIDO A DISTORSIÓN DE VOLTAJE.
- FALSO DISPARO DE INTERRUPTORES.

ARMÓNICAS TÍPICAS PARA SISTEMAS DE POTENCIA A 60 Hz.

FUNDAMENTAL	60Hz
3ª ARMONICA	180 Hz
5ª ARMONICA	300Hz
7ª ARMONICA	420Hz
9ª ARMONICA	540Hz
11ª ARMONICA	660Hz

Gracias a los avances en la electrónica de potencia y técnicas de control automatizado ha sido posible el desarrollo de filtros activos los cuales operan de acuerdo a los requerimientos de la carga en la red eléctrica.

Los filtros se usan para prevenir que las armónicas que provienen de las cargas no lineales se introduzcan de regreso al servicio de alimentación, estos dispositivos pueden ser pequeñas unidades para cargas enchufables, o dispositivos más grandes para cargas pesadas. Una variante de este tipo de filtros se muestra en la figura (5.16)

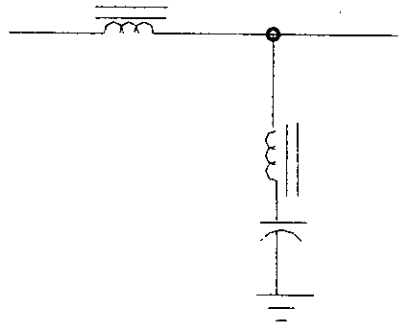


FIGURA (5.16)

Cuando se conecta una carga no lineal a la red eléctrica, hay un flujo de corrientes armónicas que además de distorsionar la onda fundamental de corriente, estas al interactuar con la impedancia del sistema distorsionan la forma de onda de voltaje.

Al conectar un filtro activo entre el sistema y la carga, el filtro se encarga de detectar que corrientes armónicas está suministrando la carga al sistema eléctrico, este filtro genera las mismas corrientes armónicas pero defasadas 180° , de tal manera que al sumarse vectorialmente en el punto de conexión del filtro se cancelan.

5.10.4 SUPRESORES DE PICOS

Los supresores de onda abarcan una amplia categoría de dispositivos desde los grandes apartarrayos hasta los pequeños supresores usados para proteger los dispositivos enchufables. La protección contra transitorios requiere el uso coordinado de estos dispositivos.

Los dispositivos a la entrada están pensados para bajar el nivel de energía de una onda transitoria muy grande a un valor tal que pueda ser amortiguada por otros dispositivos situados más cerca de las cargas.

5.10.5 COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE PICOS

Estudios recientes muestran que el 60% o más de los disturbios que se presentan en los equipos electrónicos son causados por diversas fuentes localizadas en el espacio de trabajo tal como elevadores, fotocopiadoras, aire acondicionado, etc.; ya que estos equipos son causantes de voltajes transitorios y pueden dañar a los sistemas sensitivos. Además la exposición continua a éstos disturbios eléctricos degrada la vida del equipo.

El sistema de alimentación de C.A. no es el único culpable de la transmisión de transitorios ya que rápidamente se extiende por el alambrado de comunicaciones; para evitar esto es aconsejable tener una coordinación correcta de protección contra transitorios (VER FIGURA 5.16), tanto en el sistema de potencia como en el de comunicaciones, dicha coordinación se realiza mediante zonas de protección:

Zona 0. Llamamos zona de protección "0" a la protección que se realiza desde el exterior del inmueble, es decir a la entrada exterior del servicio de energía eléctrica y telefónica.

Una tormenta eléctrica puede causar sobretensiones, interrupciones en el suministro de energía y transitorios. También por causas naturales u operación normal del equipo de la Cía. Suministradora se puede causar dichos problemas.

Zona 1. Tomando en cuenta la protección cero, ésta debe coordinarse con otra zona de protección (zona 1) para amortiguar el transitorio por etapas; ésta se realiza a la entrada del servicio en el tablero principal de C.A.

Todos los conductores metálicos que se encuentren en las proximidades (conduits, tubos de agua, etc.) deben conectarse a la tierra común de los supresores.

Zona 2. Esta etapa de protección limita los disturbios remanentes del transitorio que viene desde la entrada del servicio (y que fue limitado según las consideraciones de las dos etapas anteriores), y cualquier problema interno debe resolverse por medio de estos supresores que se instalan en los tableros de distribución (derivados) del edificio.

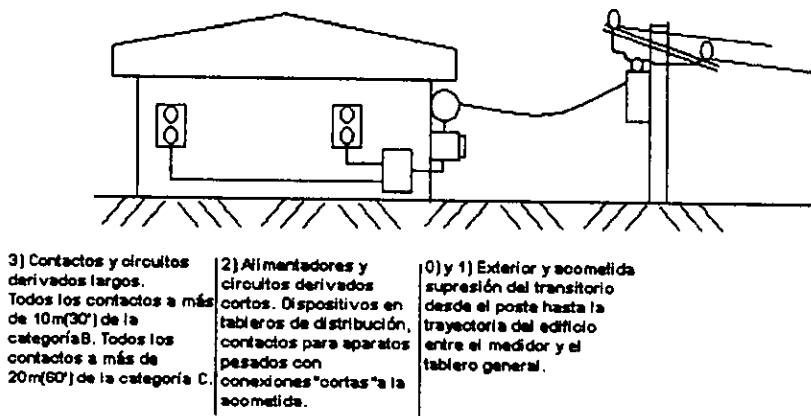


FIGURA (5.16)

Zona 3. Es la zona en la que los varistores instalados se encuentran en las estaciones de trabajo de las salas de cómputo ó comunicaciones; dichos varistores se integran en los receptáculos de las estaciones de trabajo.

Las descargas eléctricas atmosféricas o debidas a la operación del sistema producen fenómenos que son dañinos para los UPS y en general los equipos electrónicos.

Por esto a la entrada del rectificador del cargador de la UPS y los circuitos de desvío ("by pass") están equipados internamente con supresores para protección efectiva del equipo; se debe emplear conexiones de baja inductancia para ésta protección.

Además los varistores deben estar conectados a la tierra común de los equipos y no a un conductor de tierra separado del sistema de tierras.

5.10.6 REGULADORES DE VOLTAJE

La mayoría de las perturbaciones de baja frecuencia, excepto la falta de energía, se puede manejar con la aplicación adecuada de un regulador de voltaje. En la actualidad existen varios tipos de reguladores de voltaje. Proporcionan un nivel de voltaje de salida relativamente constante en estado estable para un cierto rango de voltajes de entrada, en los manuales de estos aparatos siempre se señala que deben referenciarse a una tierra física, esto para eliminar el ruido eléctrico ya que contienen también supresores y filtros.

5.10.7 TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO

Atenúa las perturbaciones en los conductores de la fuente de potencia y proporciona un punto local de referencia a tierra. Presenta devanados primario y secundario físicamente diferentes, esto es, con frecuencia del lado secundario tienen una o múltiples pantallas electrostáticas para reducir más aún el ruido en modo común, dichas pantallas se conectan a tierra.

5.10.8 FUENTES ININTERRUMPIBLES DE POTENCIA (UPS)

Mantiene la alimentación con voltaje regulado, tiene filtros y supresores integrados y las grandes unidades deben referenciarse a tierra ya que contienen un transformador de aislamiento del tipo seco.

Las más comunes usan tecnologías rectificador/inversor. Una batería alimenta la potencia al inversor cuando ocurre la interrupción de energía a la entrada.

5.11 PROBLEMAS POR RAYOS EN LAS COMPUTADORAS

Debido a la resistencia que presenta la estructura de la construcción y bajo condiciones de tormenta, el voltaje impreso en la estructura puede tornarse muy alto en el momento de una descarga atmosférica comparado con el voltaje normal de operación del equipo. Debido a esta diferencia en voltajes, se hace notar una capacitancia existente entre las computadoras y la estructura del edificio, por medio de la cual se induce un voltaje creando una diferencia de potencial en los componentes de las computadoras forzándolos a salir de su punto de operación.

FIGURA (5.17)

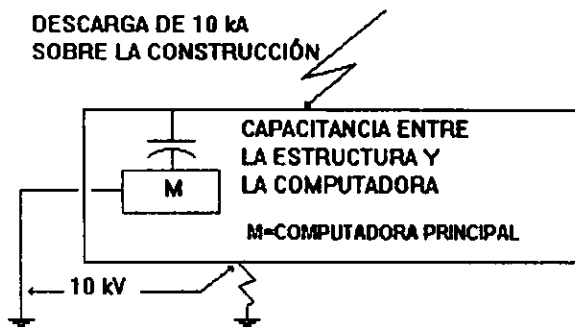


figura (5.17)

Efecto del rayo sobre la construcción con electrodos de tierra aislados (sistema de tierra no recomendado).

La interferencia introducida hacia la computadora debido a los voltajes inducidos, puede ser también generada por la presencia de nubes cargadas, aún sin haberse producido la descarga. Esos voltajes son esporádicos y transitorios y alimentan pulsos hacia los circuitos de la computadora, causando la falla de los componentes.

CAPÍTULO 6

CAPÍTULO 6

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

6.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD

Las estimaciones basadas en la clasificación del suelo den únicamente una aproximación de la resistividad. La prueba de resistividad actual es obligada, ésta deberá realizarse utilizando una guía tal como la IEEE Std. 81-1983. Dicha norma nos indica los siguientes métodos de medición de la resistividad del terreno.

1.- Información geológica y suelo uniforme

La investigación del lugar donde va a instalarse una subestación es esencial para determinar la composición del suelo y obtener algunas ideas básicas sobre su homogeneidad. Usualmente las excavaciones y otros trabajos de ingeniería civil, están cerca del sitio en donde el sistema de tierras será localizado. Las pruebas simples recientes y algunas otras investigaciones geológicas proporcionan información sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del material del suelo, principalmente por lo menos par tener alguna idea sobre su resistividad y el rango de valores en el lugar.

2.- Método de la variación de la profundidad

Este método llamado algunas veces método de las tres puntas es una prueba casi no usada. En éste método en cada medición la profundidad de electrodo de prueba es incrementada, el propósito de esto es introducir mayor corriente de prueba a través del suelo. El valor de resistencia medida reflejará la variación de la resistividad al incrementar la profundidad. Usualmente el electrodo de prueba es una varilla. Una medición es insuficiente, por lo que se deben realizar varias mediciones. El método de variación de la profundidad da información de cómo es la naturaleza del suelo en la cercana de las varillas (5 a 10 veces la longitud de las varillas).

Si se va a medir una gran área es preferible usar el método de los cuatro puntos.

3.- Método de los dos puntos

Las mediciones de resistividad de tierra pueden realizarse en campo con un medidor de resistividad de dos terminales. El aparato consiste de dos electrodos, uno más pequeño que el otro. La terminal positiva de la batería se conecta a través de un miliampérmetro por medio del electrodo más pequeño y la terminal negativa por medio del otro electrodo. El instrumento puede calibrarse para leer directamente en ohms-cm al voltaje nominal de la batería. Este tipo de aparato es fácil de transportar y se puede hacer un gran número de mediciones en corto tiempo.

4.- Método de los cuatro puntos

Para efectuar la medición de la resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es el de Frank-Wenner denominado también método de los cuatro electrodos, el equipo de medición utilizado es el megger de tierra. El método de los cuatro puntos de Wenner, es el más exacto en la práctica de mediciones de resistividad promedio de grandes volúmenes de tierra. Consiste básicamente en cuatro electrodos enterrados a lo largo de una línea recta, a igual distancia A de separación y enterrados a una profundidad B.

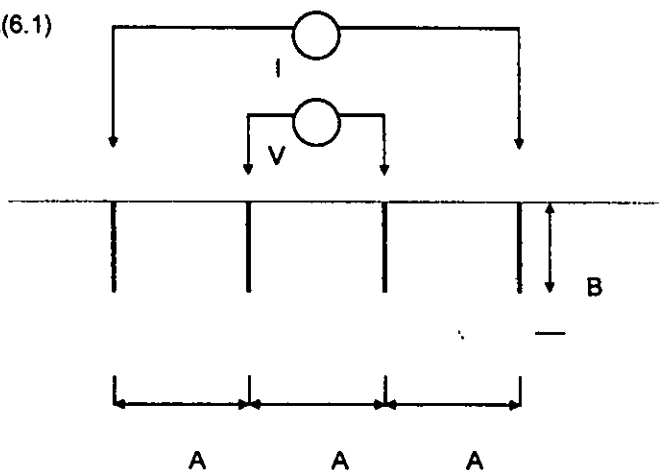
El voltaje entre los dos electrodos internos de potencial es medido y dividido entre la corriente que fluye a través de los otros electrodos externos para dar un valor de resistencia mutua R en ohms. Existen dos variaciones de éste método:

- a) Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner
- b) Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger-Palmer

a) Electrodo igualmente espaciados o arreglo de Wenner

Con este arreglo, los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la figura (6.1)

Figura(6.1)



Arreglo de Wenner o de los electrodos igualmente espaciados.

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

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

Donde:

ρ = Resistividad en Ohms-metro

A= separación entre electrodos adyacentes en metros, o bien en cm

B= Profundidad de los electrodos en metros o en cm

R= lectura del megger en Ohms

si "A" y "B" se miden en centímetros o en metros, y la resistencia R en Ohms, la resistividad estará dada en Ohms-cm o en Ohms-m respectivamente.

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

$$\rho=2\pi IAR$$

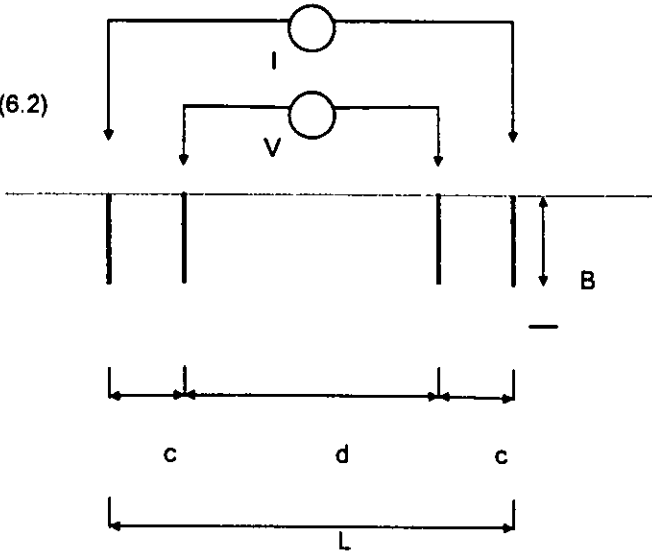
Con estas ecuaciones se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente. Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

b) Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger Palmer

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

Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede usarse el arreglo mostrado en la figura(6.2):

Figura(6.2)



Para pequeños espaciamientos entre los electrodos, la corriente tiende a fluir cerca de la superficie, considerando que la mayor parte de la corriente que penetra depende del espaciamiento entre electrodos, se asume que la resistividad medida para un espaciamiento entre electrodos "A" representa la resistividad aparente del suelo a una profundidad "B". La información de las mediciones de resistividad pueden incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición.

Los conductores desnudos enterrados que se encuentren en contacto con el suelo pueden invalidar lecturas realizadas por el método descrito si están bastante juntos de manera que alteren la trayectoria del flujo de la corriente.

Por ésta razón, las mediciones de resistividad de suelo son de menor valor en un área en donde una malla de conductores ya ha sido instalada, excepto, tal vez para mediciones poco profundas dentro o cerca de una gran malla rectangular.

En tales casos una lectura poco aproximada deberá ser tomada a corta distancia fuera de la malla, con los electrodos en tal posición que minimicen el efecto de la malla sobre las trayectorias de flujo.

Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la malla, tales anotaciones pueden ser usadas por medio de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo. los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido. La ecuación empleada en éste caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

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

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

6.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE TERRENOS

CLASE DE TERRENO	RESISTIVIDAD[Ω-m]
Terreno húmedo (suelo orgánico)	10-50
Terreno de cultivo arcilloso	100
Tierra arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca(suelo seco)	1000
Suelo rocoso húmedo(piedra molida húmeda)	3000
Roca compacta	10000

6.3 EFECTO DE LOS HILOS DE GUARDA

Los hilos de guarda de la línea de transmisión o conductores del neutro son conectados a la tierra de la subestación, aportan una porción substancial de las corrientes de tierra lejos de la red de tierra de la estación.

Donde exista esta situación, los hilos de guarda o conductores neutros, pueden ser tomados en consideración en el diseño de la red de tierras con la fórmula:

$$Z = \sqrt{Z_1 * R_2}$$

Donde:

Z_1 = Es la impedancia longitudinal del conductor.

R_2 = Resistencia que presenta la sección transversal.

Esto se realiza conectando el sistema de tierra de la subestación con los hilos de guarda, y por medio de las torres de las líneas de transmisión. Usualmente se tendrán los efectos del incremento de peligro en las bases de las torres mientras éste peligro disminuye en la subestación. Esto es debido al hecho de que en cada una de las torres cercas se repartirá la elevación del voltaje de tierra de la subestación, en lugar de ser afectada únicamente por un rompimiento de aislamiento local o un arqueo en una de las torres.

Contrariamente cuando semejante falla en una torre ocurre, el efecto de la conexión del sistema de tierras de la subestación disminuirá la magnitud de los gradientes cercanos a las bases de las torres.

Los cables enterrados en contacto efectivo con la tierra, tales como tuberías enterradas tendrán un efecto un poco similar cuando están unidos con el sistema de tierra, pero extendidos más allá de sus perimetro. Para las partes conductoras de corriente de tierra lejanas de la subestación, antes de entrar a la tierra, la elevación del potencial de la malla durante la falla, y los gradientes locales dentro de la subestación serán más bajos.

6.4.- PUNTAS PARARRAYOS

Son los electrodos que se instalan sobre la parte más elevada de las estructuras de una subestación y que sirven para complementar la red de cables de guarda que se extiende sobre los copetes de las estructuras de la subestación para protegerla de las posibles descargas atmosféricas directas.

Están fabricados con tramos de fierro galvanizado de unos 40 mm de diámetro y 3m de largo, atomillados a la estructura de la subestación y cortados en bisel en su parte superior para producir el efecto de punta.

Debido a que la descargas de los rayos son de alta frecuencia, se recomienda que las terminales de descarga de la red del hilo de guarda, así como las terminales de descarga de los pararrayos deban tener, como mínimo, el mismo calibre que la red de tierra.

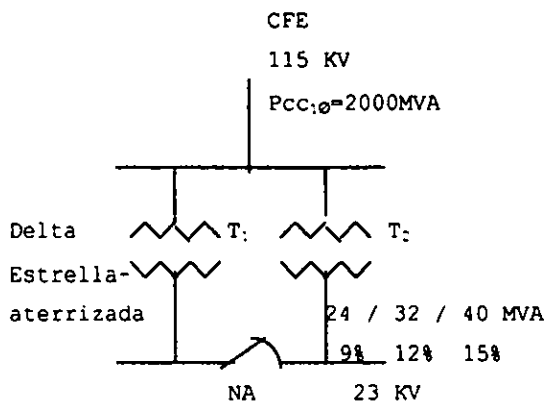
EN LA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA DE LA SUBESTACIÓN DE 115/23 KV CON CAPA SUPERFICIAL SE OBTUVIERON LOS SIGUIENTES DATOS:

ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES

VALORES	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
400	Ohm-m	Resistividad del terreno
100	m	Largo de la malla
100	m	Ancho de la malla
0.6	m	Profundidad de instalación de la malla
0.08	m	Espesor de la cubierta superficial
10,000	Ohm-m	Resistividad del concreto
9.0909	m	Espaciamiento entre conductores paralelos
25	Pza.	No. total de varillas de tierra (copperweld)
3.05	m	Longitud de c/varilla de tierra
0.3	s	Duración de la falla a tierra
30	---	Relación X/R

información proporcionada por la Compañía Suministradora para determinar la corriente de cortocircuito VER FIG (6.3).

CORRIENTE MAXIMA DE CORTOCIRCUITO (I_{cc})



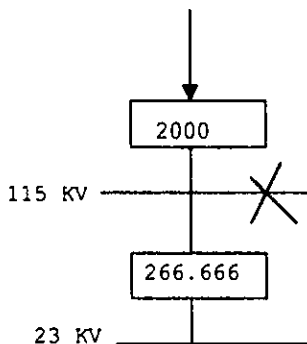
FIG(6.3)

LA FALLA MÁS SEVERA ES LA TRIFÁSICA EN EL BUS DE 115 KV.

$S_B=24 \text{ MVA}$ $V_B=115 \text{ KV}$

$$I_{B115} = \frac{24 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 120.5 [A]$$

$$I_{CC115} = \frac{2000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 10,041 [A]$$



La corriente máxima de cortocircuito considerando que el interruptor de los transformadores en paralelo está normalmente abierto es: 10,041 (A).

CAPÍTULO 7

CAPÍTULO 7

MEMORIA DE CÁLCULO

Diseño de una red de tierra para una subestación de 115/23 KV.

Objetivo

Verificar que los potenciales de contacto y de paso en la red de tierras de la subestación no excedan los valores límite de los potenciales tolerables por el cuerpo humano.

Procedimiento de cálculo:

Está basado en la norma: IEEE Std 80-1986. Guide for Safety in AC. Substation Grounding.

Datos para el cálculo.

Potencia de cortocircuito.....2000 MVA a 115KV
Resistividad del terreno..... $\rho=400$ [Ω -m]
Ancho de la red..... 100 metros
Longitud de la red.....100 metros
Resistividad superficial..... $\rho_s=10,000$ [Ω -m]
Profundidad de la red..... $h=0.6$ metros
Espesor de la capa de concreto..... $h_s=0.08$ metros
Tiempo de duración de la falla..... $t_f=0.3$ segundos
Relación X/R en el bus de falla..... 30
Longitud de las varillas de tierra.....3.05 metros
Diámetro de las varillas de tierra.....0.0159 m (5/8 "ø)
Conexión de los transformadores..... Δ/Y aterrizada
Capacidad.....24/32/40 MVA
Impedancia..... $Z=9\% \ 12\% \ 15\%$

Cálculo de la sección del conductor

FACTOR DE DECREMENTO (Df): De la ecuación 36 : Ecc. 65 IEEE. 80-1986

Para $X/R=30$ y $t_f=0.3$ seg.

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

donde:

$$T_a = \frac{X'}{\omega R} ; \quad T_a = (1/120\pi) (30) = 0.07957 ; \quad f=60 \text{ Hz}$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.07957}{0.3} \left(1 - e^{-2 \left(\frac{0.3}{0.07957} \right)} \right)}$$

$$D_f = 1.1248$$

Factor de proyección (Cp)

Considerando un aumento en la capacidad del sistema eléctrico o debido a conexiones posteriores; consideramos un incremento en la corriente de falla del 15%

$$C_p = 1.15$$

Corriente máxima de malla

De la ecuación (35):

$$I_G = C_p D_f I_g$$

$$I_G = I_{cc} D_f C_p$$

$$I_G = (10,041) (1.1248) (1.15)$$

$$I_G = 13,000 \text{ Amperes}$$

Calibre mínimo del conductor de cobre y uniones soldables para un tiempo de duración de falla de: $t_f = 0.3$ segundos.

De la ecuación (4):

$$A_{cmils} = 1973.52(13.00) \sqrt{\frac{(0.3)(0.00393)(1.7241)10^4}{3.422 \ln\left[1 + \frac{450 - 40}{234 + 40}\right]}}$$

$$A_{cmils} = 45.63 \text{ [kcmls]}$$

∴ No. 2 AWG

Si tuvieramos un $t_c=0.5$ seg, de la tabla 2

$$\frac{CMILS}{A} = 6.6$$

$$A_{cmils} = 6.6(13000) = 84385.1646 \text{ [cmils]} \Rightarrow \text{No. 1/0 AWG}$$

Por esfuerzos mecánicos y por recomendación del Diario Oficial de la Federación NOM-001-SEMP-1994 se utilizará conductor calibre 4/0 AWG.

Cálculo del factor de reducción del valor nominal " ρ_s "

De la ecuación (27):

$$\text{Factor de reflexión: } K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$K = \frac{400 - 10,000}{400 + 10,000} = -0.923$$

Considerando: $K = -0.923$ y $h_s = 0.08$ metros

De la figura 8 de la norma IEEE Std. 80-1986.

FACTOR DE REDUCCION: $C_s=0.465$

CÁLCULO DE LOS POTENCIALES TOLERABLES

De las ecuaciones 24 y 26 de la Norma IEEE Std. 80-1986: Ecc. 21,22,24 y 25 respectivamente:

$$E_{pas_{0.50Kg}} = [1000 + 6(0.465)(10,000)] \frac{0.116}{\sqrt{0.3}} = 6120.617 \text{ VOLTS}$$

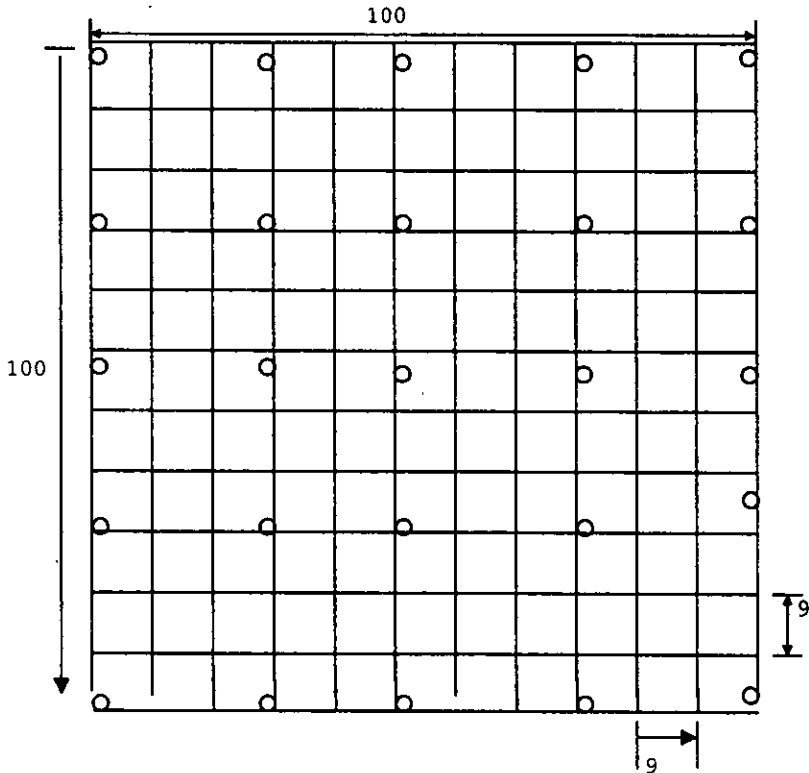
$$E_{pas_{0.70Kg}} = [1000 + 6(0.465)(10,000)] \frac{0.157}{\sqrt{0.3}} = 8283.938 \text{ VOLTS}$$

$$E_{cont_{50Kg}} = [1000 + 1.5(0.465)(10,000)] \frac{0.116}{\sqrt{0.3}} = 1688.993 \text{ VOLTS}$$

$$E_{cont_{70Kg}} = [1000 + 1.5(0.465)(10,000)] \frac{0.157}{\sqrt{0.3}} = 2285.965 \text{ VOLTS}$$

Disposición de conductores en la red

Se consideran 12 conductores paralelos y 12 conductores transversales además de 25 varillas de 3 metros de longitud (5/8") cada una, como se muestra en la siguiente figura:



Conductores paralelos=12

Número de varillas=25

Cotas en metros

De la ecuación 71 IEEE Std. 80-1986

$$L=L_c+1.15L_r;$$

$$L_c=(12 \times 100)+(12 \times 100)=2400 \text{ metros } \therefore$$

$$L=2200\text{m}+1.15(3\text{m} \times 25)$$

$$L=2486.25 \text{ metros}$$

Resistencia de la red

Para profundidades entre 0.25 y 2.5 metros, se tiene que:

$$R_g = \rho \left\{ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} * \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right\}$$

donde:

$$A = 100\text{m} \times 100\text{m} = 10,000 \text{ m}^2$$

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

$$L = 2486.25 \text{ m}$$

$$\rho = 400 \text{ } [\Omega\text{-m}]$$

$$R_g = 400 \left[\frac{1}{2486.25} + \frac{1}{\sqrt{20 * 10,000}} * \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6\sqrt{\frac{20}{10,000}}} \right) \right]$$

$$R_g = 1.9263 \text{ } [\Omega]$$

$$R_g = \frac{\rho}{4r_s} + \frac{\rho}{L} = \frac{400}{4(56.42)} + \frac{400}{2486.25}$$

donde:

r_s Radio equivalente de la superficie total

$$r_s = \sqrt{\frac{A_{RED}}{\pi}}$$

$$r_s = \sqrt{\frac{10,000}{\pi}}$$

$$r_s = 56.42 \text{ } [\text{m}]$$

$$R_g = 1.96415 \text{ } [\Omega]$$

Nota: El cálculo es más exacto utilizando la fórmula de Schwarz.

Efecto de los hilos de guarda

Efecto de los hilos de guarda (2 líneas de 115 KV, 4 hilos de guarda y 3 torres por kilómetro).

Si el hilo de guarda es de acero de 3/8" de diámetro; su resistencia es:

$$Z_1 = 1.8 \text{ } \Omega/\text{km.}$$

Resistencia equivalente de los hilos de guarda

Base de las torres = $4\text{m} \times 4\text{m} = 16\text{m}^2$

Radio equivalente:

$$B = \sqrt{\frac{16}{\pi}} = 2.256 \text{ } [\text{m}].$$

Resistencia aproximada de la torre

$$R_{\text{torre}} = \frac{\rho}{2\pi B} = \frac{400}{2\pi(2.256)} = 28.218 \text{ } [\Omega]$$

Como tenemos 3 torres por kilómetro:

$$R_1 = \frac{28.218[\Omega]}{3} = 9.4063 \text{ } [\Omega]$$

Impedancia equivalente

hilos de guarda-torres

$$Z = \sqrt{Z_1 * R_1} = 4.11 \text{ } [\Omega]$$

Considerando dos alimentadores (4 hilos de guarda) representan:

$$Z = \frac{4.11}{4} = 1.028 \text{ } [\Omega]$$

Porción de corriente que circula por la red de tierras

Haciendo un divisor de corriente:

$$\frac{1.028}{1.028 + 1.9263} = 0.3479 = 34.79\%$$

$$I_{RED} = 0.3479 \times 13,000 \text{ Amperes}$$

$$I_{RED} = 4523 \text{ Amperes}$$

Elevación del voltaje de la red

$$E = I_{RED} R_g$$

$$E = (4523 \text{ A}) (1.9263 \text{ } [\Omega])$$

$$E = 8713 \text{ Volts}$$

POTENCIALES DE CONTACTO EN LA MALLA

De la ecuación 66 de la Norma IEEE Std. 80-1986

$$E_{Tm} = \rho_t * K_m * K_i * I_{RED} / L \quad \text{Volts}$$

Cálculo de "K_m" según ecuación 68 de la Norma IEEE Std. 80-1986:

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

donde:

K_{i1}=1 Para redes con varillas Copperweld a lo largo del
perímetro o en varias partes de la red.

D Separación entre conductores=9.0909 m

h Profundidad de la red=0.6 m

d Diámetro del conductor (4/0 AWG)=0.0134 m

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

h_0 Profundidad de referencia= 1 m

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

$$K_h = 1.2649$$

$$n = \sqrt{12 \cdot 12}$$

$$n = 12$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{9.0909^2}{16(0.6)(0.0134)} + \frac{(9.0909 + 2(0.6))^2}{8(9.0909)(0.0134)} - \frac{0.6}{4(0.0134)} \right) + \frac{1}{1.2649} \cdot \operatorname{Ln} \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K_m = 0.7745$$

Cálculo de "Ki" según ecuación 68 de la Norma IEEE Std. 80-1986:

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

$$K_i = 0.656 + 0.172(12)$$

$$K_i = 2.72$$

Entonces:

$$E_{tm} = \rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G / L$$

$$E_{tm} = 400 \cdot 0.7745 \cdot 2.72 \cdot \frac{4523}{2486.25} \text{ Volts}$$

$$E_{tm_{0.5\sigma}} = 1533 \text{ Volts}$$

Cálculo de los potenciales de paso en malla según ecuación 65 de la Norma IEEE Std. 80-1986:

$$E_{pasom} = \rho \cdot K_i \cdot K_s \cdot I_{RED} / L$$

donde:

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2(0.6)} + \frac{1}{9.0909 + 0.6} + \frac{1}{9.0909} (1 - 0.5^{12-2}) \right)$$

$$K_s = 0.3330$$

$$E_{pasom} = 400 * 2.72 * 0.3330 * 4523 / 2486.25$$

$$E_{pasom} = 660 \text{ Volts}$$

Cálculo de la longitud del cable necesario para tener seguridad dentro de la subestación.

$$L = K_m * K_i * I_{RED} * \rho t / E_{t_{50kg}}$$

$$L = 0.7745 * 2.72 * 4523 * 400 / 2277$$

$$L = 1674 \text{ m}$$

Para $E_{t_{70kg}}$:

$$L = 1237 \text{ m}$$

Comparación de potenciales:

$E_{tm} < E_{t_{50kg}}$:

$$1533 \text{ V} < 1688.99 \text{ V} \quad \therefore \text{cumple}$$

$$1533 \text{ V} < 2285.96 \text{ V} \quad (70 \text{ kg})$$

$E_{pasom} < E_{pasom_{50kg}}$

$$660 \text{ V} < 6120.61 \text{ V} \quad \therefore \text{cumple}$$

$$660 \text{ V} < 8283.93 \text{ V} \quad (70 \text{ kg})$$

Además:

$L_{calculada} > L_{seguridad}$

$$2486.25 \text{ m} > 1674 \text{ m} \quad \therefore \text{cumple}$$

$$2486.25 \text{ m} > 1237 \text{ m} \quad (70 \text{ kg})$$

CAPÍTULO 8

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Partiendo de que una red de tierras tiene como principal objetivo salvaguardar la vida del personal, así como de los equipos y sistemas es de gran importancia la elaboración de un diseño que permita garantizar dicho objetivo. Para este diseño es obligatorio apearse lo más posible a la normatividad existente.

Como consecuencia del trabajo realizado se desprendieron las siguientes conclusiones:

Es de mayor importancia la correcta conexión del equipo a la malla de tierra que el de tener una resistencia considerablemente baja, ya que así podemos evitar que en caso de que ocurriera una falla se presenten diferencias de potencial entre puntos de la malla que pueden causar "shocks" o arcos eléctricos.

Todos los sistemas o equipos que requieren de conexión a tierra deberán interconectarse a la malla principal de la subestación para así garantizar que no habrán diferencias de potencial entre sistemas de tierra.

Un conductor continuo debe formar el perímetro de la malla de tierra, de manera que encierre toda el área en el que se encuentre el equipo que requiera conexión a tierra, incluyendo la malla ciclónica que delimita la subestación.

La malla de tierra para la subestación se construirá con un cable conductor de cobre desnudo, calibre 4/0 AWG temple semiduro.

La separación entre electrodos [COPPERWELD] debe ser por lo menos la longitud del electrodo y máximo dos veces su longitud.

La puesta a tierra de sistemas, circuitos, equipo, canalizaciones y pantallas de cables, "DEBE SER PERMANENTE Y CONTINUA", los elementos que la constituyen deben tener la capacidad suficiente para conducir cualquiera de las corrientes que puedan ser aplicadas y ser de impedancia suficientemente baja para evitar diferencias de potencial que puedan dañar, tanto al personal como a los equipos; además de facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes del circuito.

No debe introducirse, ni conectarse al interior del edificio ningún cable de la red de pararrayos.

Se recomienda que las conexiones en el interior del edificio sean a compresión y las externas con soldadura "cadweld" para lugares de clima seco, y en lugares de clima húmedo o de difícil acceso, pueden utilizarse conectores mecánicos, o de compresión según las características del lugar.

Para equipo sensible es recomendable la utilización de una malla de referencia para establecer niveles de voltaje equipotencial con respecto a tierra, y será interconectada a través de una "ventana" de tierra a la malla principal de la subestación.

Para equipos sensibles, se recomienda utilizar la ventana de tierra. Estas ventanas (Barras de cobre) deben existir en cada piso del edificio e interconectarse al acero estructural y a su vez a la malla de tierras general.

En las salas de cómputo o de comunicaciones es recomendable instalar supresores de transitorios clase C en la acometida, clase B en los tableros derivados y clase A integrados en los contactos de voltaje regulado.

Para el diseño de la red principal de la subestación se consideró una frecuencia de 60 Hz, por lo que para corrientes de mayor frecuencia, su funcionamiento en teoría no sería el óptimo.

Al utilizar múltiples sistemas como el de piso falso, la tubería de agua (si es totalmente metálica y continua), la red de tierra del sistema de pararrayos, etc. debe conectarse sólidamente entre ellos y tratarse como un solo sistema. El calibre mínimo para unir estos sistemas será 1/0 AWG. [Art. 250-83 de la NOM-001-SEMP-1994.] y se recomienda hacerlo en por lo menos dos puntos.

Cuando las columnas de los edificios son de acero estructural se consideran como buenas trayectorias para descargas atmosféricas. La corriente de las descargas atmosféricas a través de esta trayectoria podría elevar el potencial de la estructura del edificio a miles de volts. Por lo que se debe integrar también a la red principal de la subestación y dicha elevación será uniforme en todo el equipo integrado a la red.

El conductor neutro debe ser referenciado a tierra uniéndolo a electrodos de tierra, y a la barra del neutro del tablero de protección general (acometida que debe estar referenciada a tierra), nunca debe estar aterrizado en el lado de la carga del tablero general. Dado que por el conductor neutro fluye corriente y si se conecta a un objeto aterrizado, la corriente fluirá por ambos circuitos.

La calidad de la energía en los sistemas eléctricos está íntimamente ligada con la conexión a tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- ◆ RAÚLL MARTÍN JOSÉ. , DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS EDITORIAL MC GRAW HILL/INTERAMERICANA DE MEXICO S.A. DE C.V. 1992.
- ◆ BAUTISTA LORENZO RODOLFO. , SISTEMAS DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS EDITORIAL ESTUDIOS Y PROYECTOS ELECTRICOS IND. 1993.
- ◆ ANSI/IEEE Std 80-1986
IEEE GUIDE FOR SAFTY IN AC SUBSTATION GROUNDING.
- ◆ ANSI/IEEE Std 142-1991
IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING OF INDUSTRIAL ANDCOMMERCIAL POWER SYSTEMS.
- ◆ ANSI/IEEE Std 446-1995
IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR EMERGENCY AND STANDBY POWER SYSTEM FOR INDUSTRIAL AND COMMERCIAL APLICATION.
- ◆ FEDERAL INFORMATION PROCESSING STANDARS PUBLICATION 94
GUIDLINE ON ELECTRICAL POWER FOR ADP INSTALLATIONS.
- ◆ ANSI/IEEE Std 1100-1992
IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR POWERING AND GROUNDING SENSITIVE ELECTRONIC EQUIPMENT.
- ◆ IEEE C62.45-1992
IEEE GUIDE ON SURGE TESTING FOR EQUIPMENT CONNECTED TO LOW-VOLTAGE AC POWER CIRCUIT.
- ◆ ANSI/IEEE Std 141-1986
IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR ELECTRIC POWER DISTRIBUTION FOR INDUSTRIAL PLANTS.
- ◆ IEEE C62.41-1991
IEEE RECOMMENDED PRACTICE ON SURGE VOLTAGE IN LOW -VOLTAGE AC. POWER CIRCUITS.
- ◆ NORMA OFICIAL MEXICANA DE INSTALACIONES ELECTRICAS NOM-001-SEMP-1994.
- ◆ LEVITON WIRING DEVICE CATALOG D-400. 1997
- ◆ CATALOGO TELECOMUNICACIONES Y ELECTRONICA CONDUMEX. 1993.
- ◆ ACME TRANSFORMERS GENERAL CATALOG. 1994
- ◆ CATALOGO CONDUCTORES MONTERREY TRANSFORMADORES PROLEC 1998
- ◆ ABB SISTEMAS, CALIDAD TOTAL DE LA ENERGIA FILTROS ACTIVOS.
- ◆ CADWELD CONEXIONES ELECTRICAS. , MEXERICO S.A.

- ◆ WIREMOLD SUPRESORES TVSS CATALOGO SENTREX ,1997.
- ◆ BALANCED POWER III. UNINTERRUPTIBLE POWER SYSTEM. , IPM INTERNATIONAL POWER MACHINES.