



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA PARA LAS
SUBESTACIONES ELECTRICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA

HERIBERTO ROJAS SCOTT

ASESOR: ING. BENJAMIN CONTRERAS SANTACRUZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Diseño del Sistema de Tierra para las Subestaciones Eléctricas".

que presenta El pasante: Heriberto Rojas Scott.
con número de cuenta: 7535289-1 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAÍZ HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 24 de Septiembre de 1995

PRESIDENTE Ing. Benjamín Contreras Santacruz
VOCAL Ing. Cealildo Rodríguez Arriola
SECRETARIO Ing. Ma. de la Luz González Quijano
PRIMER SUPLENTE Ing. Oscar Cervantes Torres
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Víctor Hugo Landa Orozco

[Firma]
Res. 24-IX-95
[Firma]
[Firma]

AGRADECIMIENTOS

A DIOS:

QUIÉN ME DIO LA VIDA Y LA OPORTUNIDAD DE TERMINAR MI CARRERA.

A MIS PADRES:

QUIENES ME APOYARON Y ALENTARON EN EL TRANCURSO DE MI CARRERA HASTA SU TÉRMINO Y DONDE MI PADRE LO SIGUE HACIENDO HASTA ESTOS MOMENTOS.

A MI ASESOR:

QUIÉN ME APOYÓ Y ME GUIÓ PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A MIS HERMANOS:

QUIENES COLABORARON DIRECTA E INDIRECTAMENTE EN LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A MIS AMIGOS VICTOR, ANSELMO Y ALBINO:

QUIENES ME AYUDARON INCONDICIONALMENTE EN LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A MIS SUEGROS Y CUÑADOS:

QUIENES ME AYUDARON INDIRECTAMENTE EN LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A MI ESPOSA:

QUIÉN ME APOYÓ Y ME ALENTO EN LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.

A MI HIJO DIEGO:

AL CUAL LE DEDICO MUY ESPECIALMENTE ESTE TRABAJO PARA UN EJEMPLO DE SUPERACIÓN EN SU EDUCACIÓN FUTURA.

ÍNDICE

Í N D I C E

	Pág.
I N T R O D U C C I Ó N	6
1. GENERALIDADES	8
1.1 FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRA	8
1.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA	8
1.3 MATERIAL PARA CONDUCTORES Y ELECTRODOS	9
1.4 MATERIAL PARA CONECTORES	9
2. ANÁLISIS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO, MEDICIONES DE CAMPO Y SELECCIÓN DEL MODELO DEL SUELO	12
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.2 RESISTIVIDAD DEL TERRENO, DEFINICION Y UNIDADES	12
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	12
2.4 EFECTOS DEL GRADIENTE DEL VOLTAJE	13
2.5 EFECTO DE LA MAGNITUD DE LA CORRIENTE	13
2.6 EFECTO DE LA HUMEDAD, TEMPERATURA Y CONTENIDO QUÍMICO SOBRE LA RESISTIVIDAD	14
2.7 TÉCNICAS DE MEDICIÓN	15
2.8 CLASIFICACIÓN DE TIERRA Y RANGOS DE RESISTIVIDAD	19
3. CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA, ANÁLISIS DE FALLAS, DIVISIÓN DE CORRIENTE Y ASIMETRÍA.	21
3.1 DETERMINACION DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA	21
3.2 CORRIENTE SIMÉTRICA DE MALLA	21
3.3 CORRIENTE MÁXIMA DE MALLA	22
3.4 EFECTO DE LA ASIMETRÍA, FACTOR DE DECREMENTO	22

		Pág.
3.5	FACTOR DE DIVISIÒN DE LA CORRIENTE DE FALLA	24
3.6	TIPOS DE FALLA A TIERRA	24
3.7	EFECTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA	25
4.	RESISTENCIA A TIERRA.	28
4.1	CÁLCULOS SIMPLIFICADOS	28
4.2	FÒRMULA DE SCHWARZ	30
5.	CÁLCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.	34
5.1	RANGO DE CORRIENTE TOLERABLE	34
5.2	EFECTO DE LA CAPA DE ROCA TRITURADA EN LA SUPERFICIE DE LA SUBESTACIÒN	38
5.3	POTENCIAL DE PASO TOLERABLE	41
5.4	POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE	41
6.	CÁLCULO DE LA SECCIÒN DEL CONDUCTOR	45
7	CÁLCULO DE POTENCIALES EN LA MALLA.	50
7.1	POTENCIAL DE CONTACTO (POTENCIAL DE MALLA)	50
7.2	POTENCIAL DE PASO	51
7.3	LIMITACIONES EN EL EMPLEO DE LAS ECUACIONES	52
7.4	LONGITUD MÍNIMA DE CONDUCTOR DE MALLA	53
8.	PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO.	55
9.	APLICACIÒN PRÁCTICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO	61

	Pág.
ANEXOS	69
CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	93
APENDICE	
A. DIBUJOS DESCRIPTIVOS DE ALGUNOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE TIERRAS	94
B. FOTOGRAFÍAS SOBRE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE TIERRAS	107

INTRODUCCIÓN

I N T R O D U C C I Ó N

Durante la última década, el desarrollo y aplicación de modelos y técnicas de evaluación para los estudios de sistemas de potencia han mejorado considerablemente, uno de estos estudios es el diseño de sistemas de tierra para las subestaciones eléctricas.

Si bien la necesidad de un adecuado diseño del sistema de tierra ha sido reconocido por muchos años, los criterios normalizados de diseño fueron establecidos hace solo 27 años con la publicación en 1961 de la Norma AIEE Std 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding del American Institute of Electrical Engineers (AIEE).

Desde esa fecha se han publicado muchos trabajos que han mejorado los criterios de diseño y han desarrollado mejores métodos de análisis para determinar la eficacia de los sistemas de tierra.

En 1976 aparece la edición de la Norma IEEE Std del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) conteniendo solo algunos cambios de la edición anterior, siendo el principal, la revisión de un valor más estricto para la corriente permisible en el cuerpo humano.

La edición 1986 de la Norma IEEE Std 80 contiene mayores cambios en los pasos a seguir en el procedimiento del diseño.

El presente proyecto se realizó para mencionar los criterios básicos que deben tomarse en cuenta para efectuar los estudios con el fin de reducir los posibles daños debido a condiciones de falla.

Así mismo se explicará detalladamente su aplicación práctica en un sistema eléctrico industrial.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE TIERRA.

Proveer:

1. Un medio seguro para proteger al personal en la proximidad de sistemas o equipos conectados a tierra, de los peligros de una descarga eléctrica bajo condiciones de falla.
2. Un medio para disipar las corrientes eléctricas a tierra, sin que se excedan los límites de operación de los equipos.
3. Una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran (transformadores, reactores, etc.).
4. Un medio de descarga y desenergización de equipos antes de proceder a tareas de mantenimiento.
5. Facilitar mediante la operación de relevadores y otros dispositivos de protección, la eliminación de fallas a tierra en el sistema.

1.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE TIERRA.

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

Conductores
Electrodos o varilla de tierra
Conectores o juntas

Cada elemento tendrá las siguientes características:

Resistencia a la corrosión. Para retardar su deterioro en el ambiente que se localice.

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

Capacidad de conducción de corriente. Suficiente para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos durante las más severas condiciones de magnitud y duración de la corriente de falla.

Resistencia mecánica y robustez. De tal manera que soporte esfuerzos electromecánicos y daño físico.

1.3 MATERIAL PARA CONDUCTORES Y ELECTRODOS

Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente cables trenzados de cobre, cobre estañado, Copperweld (acero recubierto con cobre), acero, acero galvanizado, acero inoxidable o aluminio.

Los electrodos o varillas de tierra son generalmente de acero, acero galvanizado, acero inoxidable, copperweld o acero embebido en concreto.

El factor principal en la selección de los materiales es la característica de corrosión que presentan al estar enterrados.

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

Para los electrodos o varillas el material más empleado es el copperweld, ya que combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, también se emplean varillas de acero galvanizadas para protegerlas de la corrosión.

El calibre de los conductores se determinará por requerimientos de conducción de corriente y el diámetro de las varillas por resistencia mecánica.

1.4. MATERIAL PARA CONECTORES.

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

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

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

Generalmente se usan dos tipos de conectores:

Tipo presión. Incluyen todas las conexiones que mediante presión mantienen en contacto al conductor con el conector. En este tipo están comprendidos los de tornillo y los de compresión. Estos conectores deberán diseñarse para una temperatura de 250°-350° C.

Tipo soldable o exotérmico. El cual mediante una reacción química el conductor y el conector se sueldan en una conexión molecular.

Este tipo de conector por su naturaleza soporta la misma temperatura de fusión que el conductor.

CAPÍTULO 2

2. ANÁLISIS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO. MEDICIONES DE CAMPO Y SELECCIÓN DEL MODELO DEL SUELO.

2.1. INTRODUCCIÓN

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

El principal objetivo del diseño de una red de tierras es limitar estos parámetros a valores seguros.

2.2. RESISTIVIDAD DEL TERRENO. DEFINICIÓN Y UNIDADES.

La resistividad eléctrica o resistencia específica de un terreno, es la resistencia de un volumen de éste, el cual tiene un área con sección transversal y longitud unilateral.

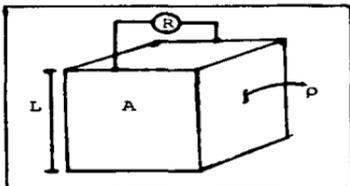


Figura 1

De la ecuación:

$$R = \rho L/A$$

Despejando a ρ :

$$\rho = R A/L = \text{Ohms} \frac{\text{long} \times \text{long}}{\text{long}} = \text{Ohms} \cdot \text{long}$$

En el sistema métrico:

- ρ = Resistividad del terreno en Ohms - metro
- R = Resistencia en Ohms.
- A = Área de la sección transversal en m².
- L = Longitud en m.

La resistividad del terreno para un diseño de tierras generalmente se determina con datos de campo, ya que la resistividad del terreno varia tanto horizontal como verticalmente, los datos generalmente conocidos como "perfil de resistividad aparente del suelo", se obtienen por pruebas y en varios lugares hasta una cierta profundidad en el terreno de la subestación.

Un modelo del terreno con sus parámetros empleados en el diseño, puede determinarse por simples técnicas o por los métodos más sofisticados de computadora.

2.3. CARACTERISTICAS DEL SUELO

El comportamiento de una varilla o electrodo de tierra enterrada en el suelo, puede analizarse por medio del circuito mostrado en la figura:

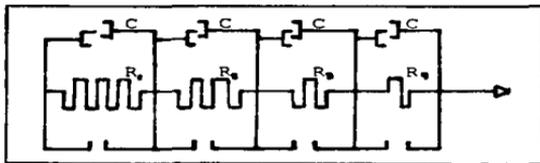


Figura 2

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

2.4. EFECTOS DEL GRADIENTE DE VOLTAJE

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

Una vez excedido, se desarrollará un arco en la superficie del electrodo que avanzará hacia tierra a fin de incrementar el tamaño efectivo del electrodo, hasta que los gradientes son reducidos a valores que el material del suelo pueda soportar.

Esta condición se ilustra con la presencia de gaps en la Fig. 2.

Ya que el sistema de tierras, de la Subestación se diseña para cumplir con criterios más rigurosos de límites de voltajes de paso y de contacto, el gradiente puede suponerse que está por debajo del valor crítico.

2.5. EFECTOS DE LA MAGNITUD DE LA CORRIENTE

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

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

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

2.6. EFECTO DE LA HUMEDAD, TEMPERATURA Y CONTENIDO QUÍMICO SOBRE LA RESISTIVIDAD.

La resistividad de la mayoría de los suelos se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso del suelo. La cantidad de agua en el suelo depende del tamaño de las partículas, su compactación y variabilidad. Sin embargo como se muestra en la Fig. 3, curva 2, la resistividad se afecta muy poco una vez que el contenido de humedad excede el 22%.

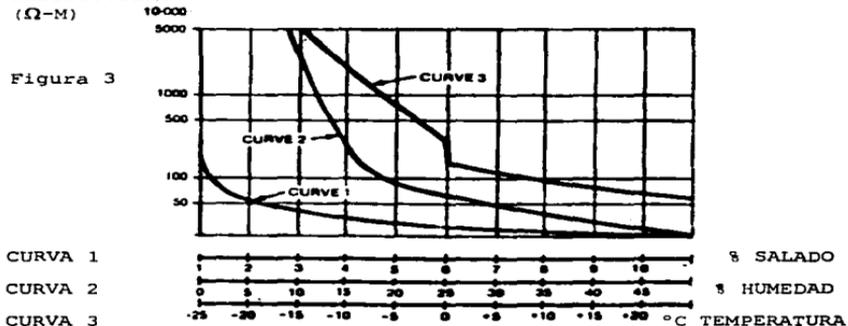
La curva 3 de la Fig. 3, muestra la variación típica de la resistividad del suelo con respecto a la temperatura para un suelo arcilloso contenido 15.2% de humedad por peso.

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

La composición y la cantidad de sales solubles, ácidos o Alkalís presentes en el suelo, pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva 1 de la Fig. 3, ilustra el efecto típico de la sal (Cloruro de sodio) sobre la resistividad del suelo que contiene 30% de humedad por peso.

RESISTIVIDAD
(Ω -M)

Figura 3



2.7 TECNICAS DE MEDICIÓN.

La investigación en campo del terreno de una Subestación, es esencial para determinar tanto la composición general del suelo como la obtención de algunas ideas básicas acerca de su homogeneidad.

Generalmente excavaciones y otros trabajos de Ingeniería Civil están ya en desarrollo en o cerca del sitio donde se localizará la malla de tierras.

La resistividad del suelo para el diseño de una red de tierras generalmente se determinará recopilando datos de campo en el sitio en cuestión. Ya que existen variaciones tanto horizontal como verticalmente en la

composición de un suelo, es conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno. La mayor cantidad posible de datos obtenidos en las pruebas nos permitirá seleccionar con precisión el modelo del suelo a usar en el diseño de nuestra red.

Existen 2 métodos para la medición de la resistividad del terreno:

a) MÉTODO DE 4 PUNTOS O MÉTODO DE WENNER.

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

Se entierran pequeños electrodos a una profundidad "b" y espaciados a intervalos "a". Se hace circular una corriente de prueba I entre los dos electrodos exteriores y se mide con un voltmetro de alta impedancia el voltaje en los 2 interiores. La relación V/I nos dará la resistencia en Ohms.

Existen 2 variaciones en este método:

A) Electrodos igualmente espaciados o Arreglo de Wenner. Con este arreglo los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la Fig. 4-a.

Sea "a" la distancia entre dos electrodos adyacentes, entonces la resistividad en términos de las longitudes "a" y "b" que podemos medir será:

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

Donde: ρ = Es la resistividad del suelo en ohms-metro.

r = Es la resistencia en ohms resultado de dividir el voltaje entre el potencial de prueba por la corriente fluida entre la corriente en los electrodos.

a = Es la distancia entre los electrodos adyacentes en metros.

b = Es la profundidad de los electrodos en metros.

La localización de los electrodos es sobre una línea recta

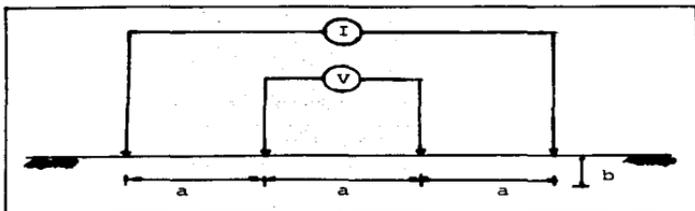


figura 4a

Si la longitud "b" es mucho menor que la longitud "a", puede despreciarse y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR$$

y dá aproximadamente la resistividad promedio también conocida como resistividad aparente) del terreno.

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

B) Electrodoos no igualmente espaciados o Arreglo de Schlumberger - Palmer.

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud del voltaje entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamento grande entre los electrodos de corriente, puede usarse el arreglo mostrado en la Fig. 4b.

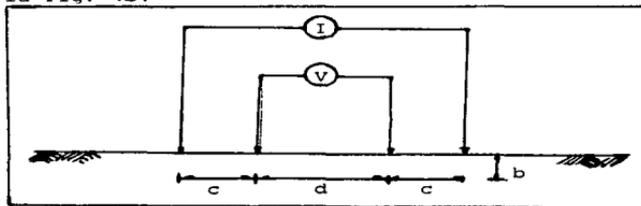


Figura 4-b

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

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

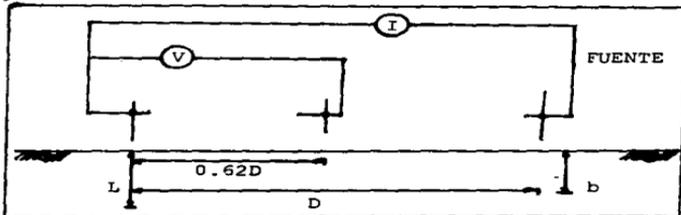
$$\rho_a = \frac{\pi(c+d)r}{d}$$

Además con valores grandes de $(d/(2c + d))$, las variaciones de las resistividades medidas debidas a irregularidades en la superficie son reducidas a un mínimo, dando mediciones más precisas.

b) MÉTODO DE TRES PUNTOS O DE CAÍDA DE POTENCIAL

El diagrama de conexiones para este método se muestra en la Fig. 5:

Figura 5



En este método la profundidad L de la varilla de prueba localizada en el terreno es variable. Las otras dos varillas conocidas como varillas de referencia se entierran a poca profundidad "b" y espaciadas sobre la línea recta; con la varilla de voltaje localizada a 62% de la distancia entre la varilla de corriente y la varilla de prueba.

Para minimizar la interferencia inter-electrodos, la varilla de corriente deberá localizarse al menos a una distancia $5L_{max}$ alejada de la varilla de prueba.

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

Para un suelo uniforme, la resistividad de una varilla de longitud L y diámetro D enterrada en suelo de resistividad ρ está dada por:

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

ó

$$\rho = \frac{2\pi L r}{\ln \frac{2.943L}{D}}$$

Para cada longitud L de la varilla, la resistencia r medida determina el valor de resistividad aparente, el cual cuando se grafica contra L es de gran ayuda para determinar las variaciones de la resistividad del terreno con la profundidad.

2.8 CLASIFICACION DE TIERRA Y RANGOS DE RESISTIVIDAD

Un numero de tablas existen en la literatura, enseñando los tramos de resistividad para varias tierras y rocas. La tabulación de Rudenberg/55/, tiene la ventaja de extrema simplicidad. Mas datos detallados están disponibles en el Handbooks Engineering y publications /59 60 61/.

TIPO DE TIERRA	RESISTIVIDAD	PROMEDIO
TIERRA VEGETAL ORGANICA HUMEDA	10	ΩM
TIERRA VEGETAL HUMEDA	10 ²	ΩM
TIERRA VEGETAL SECA	10 ³	ΩM
SUPERFICIE DE ROCA	10 ⁴	ΩM

TABLA DE RESISTIVIDAD

CAPÍTULO 3

3. CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA, ANÁLISIS DE FALLAS, DIVISIÓN DE CORRIENTES Y ASIMETRÍA.

3.1. DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA.

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

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

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

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

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

3.2. CORRIENTE SIMÉTRICA DE MALLA.

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

$$I_g = S_f I_f$$

Donde:

I_q = Corriente simétrica de malla en Amperes

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

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

3.3 CORRIENTE MÁXIMA DE MALLA.

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

$$I_q = C_p D_f I_f$$

Donde

I_q = Corriente máxima de malla en Amperes.

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

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

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

3.4 EFECTO DE LA ASIMETRÍA. FACTOR DE DECREMENTO

La máxima corriente de malla I_q , como se describe en el punto 3.3. de estas notas, es la máxima corriente asimétrica que fluye entre la malla de tierra y el terreno que la rodea.

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

Ya que el diseño de la red de tierra debe considerarse la corriente simétrica, debemos encontrar un factor llamado de decremento D_f el cual tomará en cuenta el efecto de desplazamiento de la componente de cd.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_f}{T_s} \left[1 - \lambda \frac{T_f}{T_s} \right]}$$

Donde:

T_f = Duración de la falla en segundos.

T_s = Constante de tiempo subtransitoria en segundos.

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

WR

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

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

Factor decremento para varias relaciones X/R

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

3.5. FACTOR DE DIVISIÓN DE LA CORRIENTE DE FALLA.

Se define como:

$$S_f = I_g / 3I_0 = I_g / I_r$$

Donde :

I_g = Corriente simétrica de malla.

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

3.6. TIPOS DE FALLA A TIERRA.

Pueden ocurrir diferentes tipos de falla en el sistema, pero desafortunadamente es difícil determinar que tipo de falla y su localización, proporcionará el mayor flujo de corriente entre la malla de tierras y el terreno que la rodea. (Corriente I_g en las figuras 6, 7, 8 y 9).

En la determinación de los tipos de falla deberá considerarse la probabilidad de que ocurra la falla.

Para propósitos prácticos se recomienda que la investigación sobre máxima corrientes se realice únicamente con la falla de línea a tierra (monofásica) y de dos líneas a tierra (bifásica a tierra).

Las fórmulas para calcularlas son respectivamente:

$$I_0 = E / X_1 + X_2 + X_0 \qquad I = EX_2 / X_1 (X_0 + X_2) + X_2 X_0$$

Donde:

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

E = Voltaje en el punto de falla.

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

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

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

3.7. EFECTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA.

En la mayoría de los casos, es suficiente calcular la corriente máxima de malla I_0 como se describió en los párrafos anteriores, despreciando las resistencias de los elementos del sistema eléctrico, la resistencia a tierra de la malla y la impedancia de la falla.

El error que se introducen en los cálculos es despreciable dando más margen de seguridad a la red, ya que la corriente calculada es ligeramente mayor.

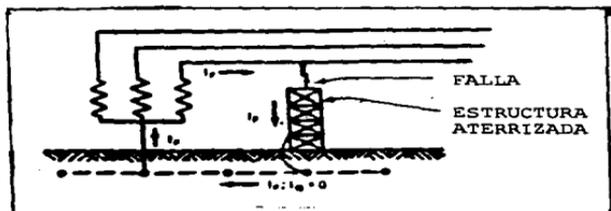


Figura 6
Falla Local en la Subestación
Neutro Aterrizado localmente

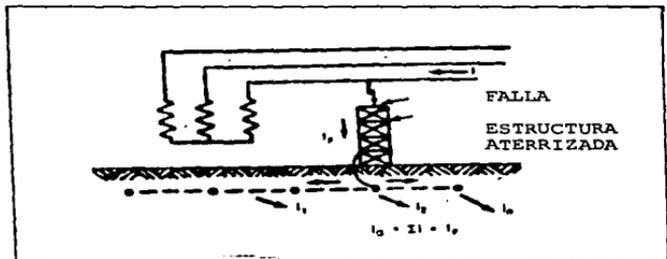


figura 7
Falla Local en la Subestación
Neutro Aterrizado Remotamente



Figura 8
Falla local en la subestación, sistema aterrizado localmente y en otros puntos.

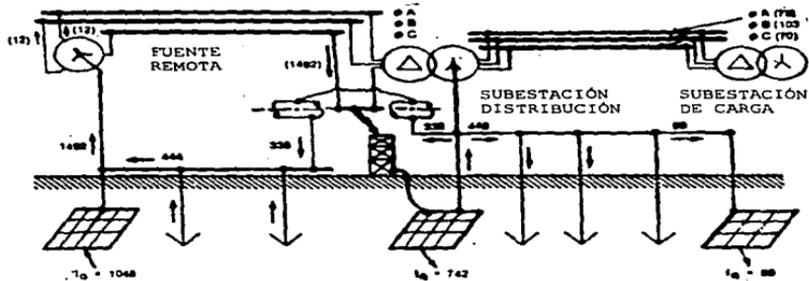


Figura 9
División de corrientes para una falla en el lado de alta tensión de una subestación de distribución.

CAPÍTULO 4

4.- RESISTENCIA A TIERRA.

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

Para subestaciones de potencia es recomendable tener valores de resistencia a tierra cercanos a 1 Ohm ó menos, mientras que en subestaciones de distribución en rango aceptable es de 1 a 5 Ohms dependiendo de las condiciones locales.

4.1. CÁLCULO SIMPLIFICADOS

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

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

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

$$R_0 = \frac{\rho}{4r} \dots\dots\dots 1$$

$$r = \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

Donde:

- R_0 = Resistencia a tierra en Ohms.
- ρ = Resistividad promedio del suelo en Ohms-metro
- A = Area ocupada por la malla de tierra en M_2 .

Puede obtenerse un valor límite de la resistencia agregando un término a la fórmula anterior:

$$R_{00} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad \dots\dots\dots 2$$

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

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

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

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

$$R_z = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \right] \quad \dots\dots\dots 3$$

Donde h es la profundidad de la malla en metros.

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

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

Para una mejor estimación de la resistencia a tierra de mallas con varillas de tierra, deberá emplearse la fórmula de Schwars descrita a continuación.

4.2. FÓRMULA DE SCHWARZ

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

La resistencia total es:

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

..... 4

Donde:

R_1 = Resistencia de los conductores de la malla.

R_2 = Resistencia de todas las varillas de tierra.

R_{12} = Resistencia mutua entre el grupo de conductores y el grupo de varillas.

Esta fórmula supone condiciones de suelo uniforme. Sin embargo, en la práctica es común que al enterrarse la varilla, alcance capas de suelo de mayor conductividad por lo que las expresiones para R_2 y R_{12} han sido modificadas.

$$R_1 = \left(\frac{\rho_s}{\pi l_1} \right) \left[\text{LN} \left(\frac{2l_1}{h'} \right) + k_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - k_2 \right] \dots\dots\dots 5$$

$$R_2 = \left[\frac{\rho_s}{2\pi n l_2} \right] \left[\text{LN} \left(\frac{8l_2}{d_2} \right) - 1 + 2k_1 \left(\frac{l_2}{\sqrt{A}} \right) (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \dots\dots\dots 6$$

$$R_{12} = \left[\frac{\rho_s}{\pi l_1} \right] \left[\text{LN} \left(\frac{2l_1}{l_2} \right) + k_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - k_2 + 1 \right] \dots\dots\dots 7$$

Donde:

ρ_1 = Resistividad del suelo encontrada para la malla de conductores enterrados a una profundidad h en ΩM .

ρ_a = Aparente resistividad del suelo para una varilla de tierra en ΩM .

H = Densidad de la capa superior del suelo en ΩM .

ρ_2 = Resistividad del suelo desde profundidad h . descendente en ΩM .

l_1 = Longitud total de la red de conductores en metros.

l_2 = Longitud promedio de una varillas de tierra en metros.

h = Profundidad de malla enterrada en metros.

$h' = \sqrt{d_1 h}$ Para conductores enterrados a profundidad H , o $0.5 d_1$ para conductores a $h = 0$ (en superficie enterrada)

A = Área cubierta por una malla de dimensiones $a \cdot b$ en m^2 .

n = número de varillas de tierra colocadas en el área A .

K_1, K_2 = constantes relacionadas a la geometría del sistema [Fig (a) y (b)]

d_1 = diámetro de la red de conductores en metros

d_2 = diámetro de la varilla de tierra en metros.

a = longitud de la red del lado corto en metros.

b = longitud de la red del lado largo en metros.

Las ecuaciones 5, 6 y 7 son válidas para suelos con 2 capas, con la capa superior de espesor H en la cual las varillas penetran para alcanzar la capa inferior. En tal caso, esto es para $\rho_1 \geq \rho_2$ donde la malla está enterrada en la capa superior ρ_1 pero las varillas están parte en la capa ρ_1 y parte en ρ_2 , el cálculo de R_2 y R_{12} se realiza con

una resistividad aparente ρ_a vista por las varillas de tierra igual a:

$$\rho_a = I_2[\rho_1\rho_2[\rho_2H + \rho_1(l_2 - H)]]$$

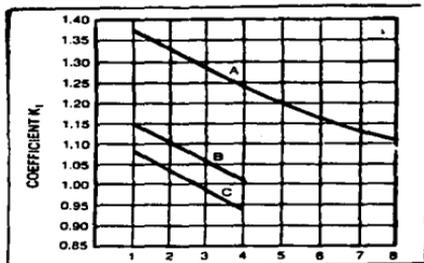
Para el caso más general, en que la parte superior de las varillas están a la misma profundidad de la malla:

$$\rho_a = \frac{I_2(\rho_1\rho_2)}{[\rho_2(H-h) + \rho_1(l_2 + h - H)]}$$

Para suelo de resistividad uniforme:

$$\rho_2 = \rho_1$$

Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es muy grande (de preferencia ρ_2 no menor que $0.2\rho_1$) y el espesor de la primera capa H es al menos $0.1b$, las ecuaciones son razonablemente precisas para la mayoría de los cálculos y además fáciles de emplear.



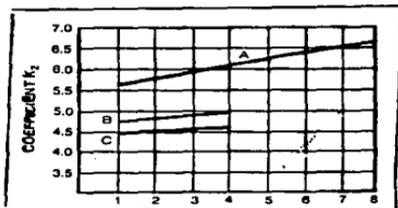
Relación Largo-Ancho

Fig.a Coeficiente K_1

Curva A para profundidad $h=0$

Curva B para profundidades $h = \frac{1}{10}\sqrt{A}$

Curva C para profundidad $h = \frac{1}{6}\sqrt{A}$



Relación Largo-Ancho

Fig.b Coeficiente K_2

CAPÍTULO 5

5. CÁLCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

5.1. RANGO DE CORRIENTE TOLERABLE.

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

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

- Percepción
- Contracción muscular
- Pérdida del conocimiento
- Fibrilación ventricular
- Paro respiratorio
- Quemaduras

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

La corriente de magnitud IB y rango de duración 0.03 a 3 segundos que no produce fibrilación, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y se describe en la siguiente ecuación:

$$(IB)^2 t = K \quad \dots\dots\dots 8$$

Donde:

- IB = Magnitud rms de la corriente que fluye por el cuerpo.
- t = Duración del flujo de corriente.
- K = Constante empírica relacionada con la energía tolerada por un X% de una población dada.

Estos parámetros están basados en estudios en los cuales el 99.5% de todas las personas con peso aproximado de 50 Kg (110 libras) pueden soportar sin fibrilación ventricular el paso de una corriente en magnitud y duración como la de la ecuación anterior.

Despejando IB:

$$I_B = \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{t}} \quad \dots\dots\dots 9$$

Para las condiciones anteriores (50 Kg - 99.5%) el valor de K es 0.0135, por lo que:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad \dots\dots\dots 10$$

Para personas con peso aproximadamente de 70 Kg (155 libras) el valor de K es 0.0246 por lo que:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad \dots\dots\dots 11$$

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

Usando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo establecida anteriormente y las constantes apropiadas del circuito, es posible determinar el voltaje tolerable entre dos puntos críticos de contacto.

Para el análisis del circuito equivalente se aplicará la siguiente notación:

- IA = Corriente a través del circuito.
- RA = Resistencia efectiva total del circuito.
- IB = Corriente permisible por el cuerpo humano.

Por condiciones de seguridad:

$$IA < IB$$

La resistencia R_a del circuito es función de la resistencia del cuerpo R_b y de la resistencia R_r (resistencia de la tierra debajo de cada pie).

Para el análisis del circuito, el pie humano puede representarse como un disco conductor despreciando la resistencia de contacto de los zapatos.

Las resistencias propia y mutua para los discos metálicos de radio b separados una distancia d_f sobre la superficie de un terreno homogéneo de resistividad ρ son:

$$R_r = \rho / (4b) \quad \text{y} \quad R_{M_r} = \rho / (2 \pi d_f) \quad \dots\dots \text{11a y 11b}$$

Donde:

R_r = Resistencia propia a tierra de cada pie en Ohms

R_{M_r} = Resistencia mutua entre los pies en Ohms

b = Radio equivalente de un pie en m.

d_f = Separación de los pies en m.

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

$$R_{2Fs} = 2(R_r - R_{M_r}) \quad \dots\dots 12$$

$$R_{2Fp} = 0.5(R_r + R_{M_r}) \quad \dots\dots 13$$

Donde:

R_{2Fs} = Resistencia de los dos pies en serie

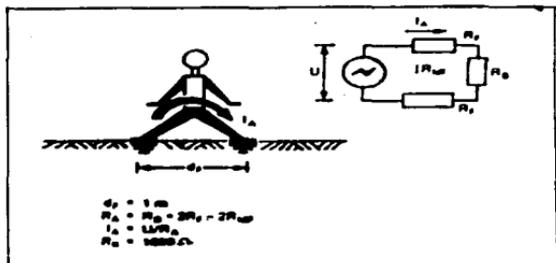
R_{2Fp} = Resistencia de los dos pies en paralelo

La figura 10 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 separados por la distancia de un paso.

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

$$R_A = R_n + 2(R_r - R_{M_r})$$

El circuito equivalente para el contacto entre una mano y los dos pies se muestra en la figura 11.



Donde:

I_a = La corriente del circuito accidentado.

R_a = La resistencia total del circuito accidentado.

Figura 10
Circuito del potencial de paso

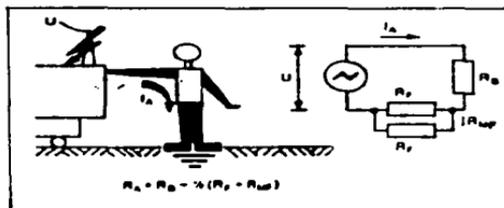


Figura 11
Circuito del potencial de contacto

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

$$R_A = R_B + 0.5(R_F + R_{M_F})$$

Se ha seleccionado para los cálculos un radio de 0.08 m (3 pulgadas) por el disco que representaría a un pie despreciando el término correspondiente a la resistencia mutua.

Con esta aproximación, las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelos de los 2 pies se obtienen en forma numérica expresadas en términos de la resistividad como:

$$R_{2FS} = 6 \rho \quad \text{y} \quad R_{2Fp} = 1.5 \rho \quad \dots 14 \quad \text{y} \quad 15$$

5.2. EFECTO DE LA CAPA DE ROCA TRITURADA EN LA SUPERFICIE DE LA SUBESTACIÓN.

Las ecuaciones 11a y 11b fueron derivadas, basadas en la suposición de un terreno con resistividad uniforme, cuando se tiene una capa de roca triturada en la superficie de la subestación (8 a 15 cm.) se incrementa la resistencia de contacto entre el terreno y los pies del personal en la subestación.

Las ecuaciones para R_F y R_{M_F} serán ahora:

$$R_F = \frac{\rho_1}{4b} F(X_1) \quad \dots \dots \dots 16$$

$$R_{M_F} = \frac{\rho_1}{2 \pi d_F} F(X_2) \quad \dots \dots \dots 17$$

Donde:

b y d_F se definieron anteriormente y $F(x)$ es una función basada en el espaciamiento entre los pies y los valores relativos de las resistividades del terreno y de la roca triturada en la superficie.

$$F(x) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad \dots \dots \dots 18$$

$$Q = \frac{K^n}{\sqrt{1+(2nx)^2}} \quad \dots\dots\dots 19$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad \dots\dots\dots 20$$

Donde:

- ρ_s = Resistividad de la roca triturada en Ohms-metro
- ρ = resistividad del terreno en Ohms-metro
- $x = x_1 = hs/b$ para R_f
- $x = x_2 = hs/d_f$ para RM_f
- hs = Espesor de la capa de roca triturada, en metros.

Como la cantidad $F(x)$ es difícil de evaluar si no se cuenta con una computadora, estos valores han sido calculados y graficados para un amplio rango de valores de x y el factor K como se muestra en la figura 12:

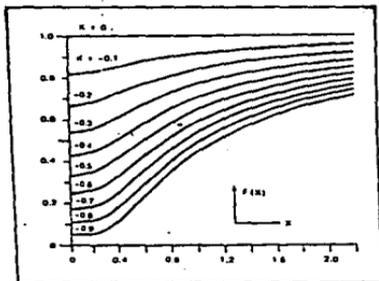


figura 12

Para simplificar el procedimiento anterior, se desprecia la resistencia mutua y el radio equivalente b se a considerado de 0.08 metros, encontrándose las ecuaciones para la

resistencia de los 2 pies en serie y paralelo de la siguiente forma:

$$R2Fs = 6.0 Cs(Hs,K) p s \quad \dots\dots\dots 21$$

$$R2Fp = 1.5 Cs(Hs,K) p s \quad \dots\dots\dots 22$$

Donde:

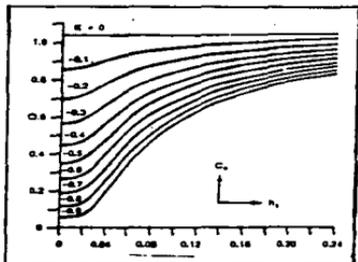
Cs = Factor de reducción del valor nominal de la resistividad superficial.

Cs = 1 para cuando la resistividad superficial es igual a la resistividad de terreno.

En cualquier otro caso:

$$Cs = \frac{1}{0.96} \left[1 + 2 \sum_{N=1}^{\infty} \frac{K^N}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nb_g}{0.08}\right)^2}} \right] \quad \dots\dots\dots 23$$

Para este último caso en que Cs < 1, donde Cs es una función de (hs,K) y el cual distingue las ecuaciones 21 y 22 de las ecuaciones 14 y 15, los valores de Cs se grafican en la siguientes figura 13:



Hs (metros)

Figura 13

5.3 POTENCIAL DE PASO TOLERABLE.

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiados anteriormente.

$$E_n = (R_n + R2F_p) IB$$

$$E_n = (1000 + 6C_s(h_s, k)\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots 24$$

$$E_n = (1000 + 6C_s(h_s, k)\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots 25$$

5.4 POTENCIA DE CONTACTO TOLERABLE.

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiados anteriormente.

$$E_t = (R_n + R2F_p) IB$$

$$E_{t,50} = \left(1000 + 1.5C_s(h_s, k)\rho_s \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \dots\dots\dots 26$$

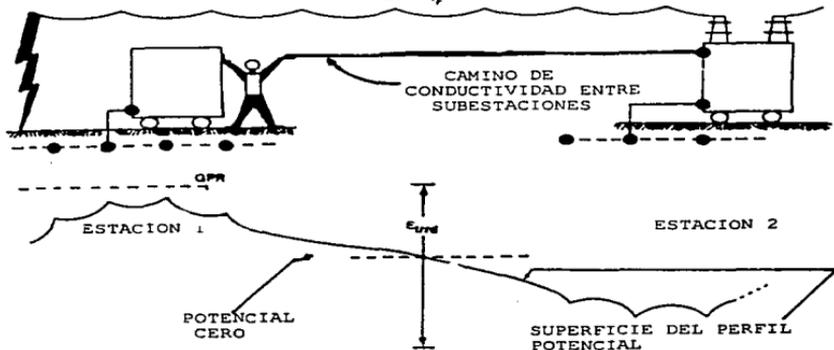
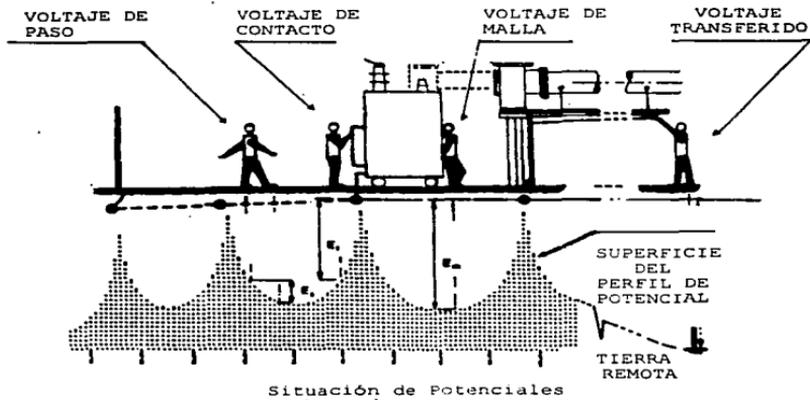
$$E_{t,70} = \left(1000 + 1.5C_s(h_s, k)\rho_s \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \right) \dots\dots\dots 27$$

Donde:

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

ps = Resistividad del material de la superficie en Ohms-metro

ts = Duración de la corriente en segundos.



Situación típica de potencial transferido.

Resistividad típica de materiales empleados como material de superficie en subestaciones.

No.	Descripción del Material en la superficie	Resistividad de muestra (Ω M)	
		seco	humedo
1	Molienda con granito y finos	140×10^6	1300
2	#57 Granito mojado similar a 3/4 pulg. cascajo	190×10^6	8000
3	Pura piedra caliza ordinariamente ligero #2	7×10^6	2000 3000
4	Granito mojado similar a 3/4 pulg. cascajo	2×10^6	10000
5	Granito mojado similar a cascajo guisante	40×10^3	5000
6	Molienda agregada a base de granito con finos		500-1000
7	Concreto	2000 10000	50-100
8	Concreto	1200 280000	21-63
9	Asfalto		10000
10	Asfalto	2×10^6 30×10^6	10000 A 6×10^6

referencia: Practical Applications of ANSI/IEEE Std. 80-1986
Guide for safety
Tutorial Course 86 EHO253-5-PWR

CAPÍTULO 6

6. CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR.

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

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

$$I = \sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_A}\right)} \quad \dots\dots\dots 28$$

Donde:

- I = Corrientes rms en kiloamperes
- A = Sección transversal del conductor en mm²
- T_m = Temperatura máxima permisible en oC
- T_A = Temperatura ambiente en oC
- Tr = Temperatura de referencia para las constantes del material en oC
- α₀ = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C
- α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia Tr
- ρ_r = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia Tr en μΩ/cm²
- Ko = 1/α₀ , ó (1/α_r) - Tr
- tc = Tiempo de duración del flujo de corriente en segundos.
- TCAP = Factor de capacidad térmica en J/cm³/oC

Nótese que α_r y ρ_r están dados para la misma temperatura de referencia. Se muestran las constantes del material en la tabla No. 1.

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

$$I = 50671 \times 10^{-6} A \sqrt{\frac{\text{TCAP}}{T_c \alpha_r \rho_r}} \ln\left(\frac{k_0 + T_M}{K_0 + T_A}\right) \quad \dots\dots\dots 29$$

Descripción	Material Conductividad (%)	α Factor @20 oC	K (1/ α_0) @0 oC	Temper. de Fusión oC	ρ_r @20 oC ($\mu\Omega/cm$)	Factor TCAP Valor efectivo ($J/cm^2/oC$)
Normal Recocido Cobre suave Alambre	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Comercial Estirado en frío Alambre de Cobre	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Recubrimiento de Cobre Núcleo de Acero Alambre	40.0	0.00378	245	1084/ 1300	4.397	3.846
Recubrimiento de Cobre Núcleo de Acero Alambre	30.0	0.00378	245	1084/ 1300	5.862	3.846
Comercial EC Aluminio Alambre	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminio Aleado Alambre 5006	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminio Aleado Alambre 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Recubrimiento de aluminio Núcleo de acero Alambre	20.3	0.00360	258	660/ 1300	8.4805	2.670
Zinc recubierto Núcleo de Acero Alambre	8.5	0.00320	293	419/ 1300	20.1	3.931
Inoxidable Acero No 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

tabla 1
Constantes del Material.

La ecuación simplificada que se utiliza para fines prácticos, para calcular el tamaño o calibre del conductor requerido es la ecuación de Onderdonk:

$$I = A \sqrt{\frac{\text{Log}_{10} \left(\frac{T_m - T_A}{234 + T_A} \right) + 1}{33S}} \dots\dots\dots 30$$

DONDE:

- I= Es la corriente en amperes.
- A= Sección Transversal del conductor en MM²
- T_A=Temperatura ambiente en °C
- T_M=Temperatura máxima permisible en °C
- S= Tiempo de duración de flujo de corriente en segundos.

La figura 14 y la tabla 2, proporcionan una referencia rápida para algunos materiales, suponiendo los siguientes parámetros de diseño.

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

Tiempo falla (s)	100%Cu	97%Cu	40%CCS	30%CCS	97%Cu/ 450oC	Limite tempera (250 oC)
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	18.7	23.5
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3

Tabla 2
Tamaño mínimo de conductor (cmils/A)

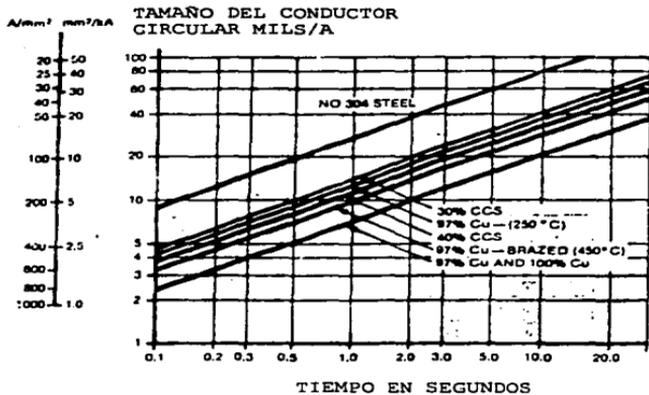


Figura 14
 Nomograma para cálculo de conductores

CAPÍTULO 7

7. CÁLCULO DE POTENCIALES EN LA MALLA.

7.1 POTENCIAL DE CONTACTO (POTENCIAL DE MALLA).

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_c = \rho K_M K_1 I_c / L \quad \dots\dots\dots 31$$

Es el producto del factor geométrico K_M , el factor de corrección K_1 , la resistividad del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de conductor enterrado I_c/L .

Donde:

K_M = Es un coeficiente que acepta en cuenta el efecto del número N , espaciamiento D , diámetro d , y profundidad h , de la red de conductores.

K_1 = Es un factor de corrección de irregularidad, para permitir la corriente de tierra para diferentes partes de la red.

ρ = Es la resistividad promedio del suelo en ohm-metro.

I_c = Es la maxima corriente total en amperes, fluida entre la red de tierras y el suelo.

L = Es la longitud total del conductor enterrado en M.

Cálculo del factor K_M :

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \left[\text{LN} \left(\frac{D^2}{16Hd} \right) + \frac{1}{\pi} \text{LN} \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots \text{etc.} \right]$$

Donde:

H = Profundidad de la malla.

D = Separación entre conductores de la malla.

d = Diámetro de los conductores de la malla

El número de factores en los parentésis mencionados arriba es el número de conductores paralelos en la red excluyendo el cruzamiento de las conexiones.

Cálculo del factor K_1 :

$$K_1 = 0.656 + 0.172N$$

Donde:

N=Número de conductores paralelos en una dirección.

Cálculo de la longitud L:

Para mallas con varillas de tierra:

$$L = L_c + 1.15 L_r$$

Donde:

L_c es la longitud de conductores enterrados en la malla y L_r representa la longitud total de las varillas de tierra. El factor de multiplicación 1.15 toma en cuenta que la densidad de corriente es mucho mayor en las varillas cerca del perímetro que en los conductores.

Para mallas sin varillas o solamente algunas localizadas en la malla pero lejos del perímetro:

$$L = L_c + L_r$$

7.2 POTENCIAL DE PASO.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$EP = \rho K_2 K_1 I_c / L \quad \dots\dots\dots 32$$

Donde: K_2 = Es un coeficiente que acepta en cuenta el efecto del número N, el espaciamiento D, y la profundidad h, de los conductores de tierra.

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

Cálculo del factor K_s :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} \dots \text{etc.} \right]$$

Donde:

H= Profundidad de la malla.

D= Separación entre conductores de la malla.

El número total de terminos dentro del paréntesis es igual al número de conductores paralelos en la red, excluyendo el cruzamiento de las conexiones.

El valor para K_s depende de la profundidad de la malla, ya que el potencial de paso decrece rápidamente cuando se incrementa la profundidad.

7.3 LIMITACIONES EN EL EMPLEO DE LAS ECUACIONES.

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

$$n \leq 25$$

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

$$d < 0.25h$$

$$D > 2.5 m$$

También para mallas rectangulares con conductores de ambas direcciones igualmente espaciados (retícula cuadrada), el valor de n para determinar los factores K_M y K_i para el cálculo de E_c , será la medida geométrica del número de conductores en ambas direcciones:

$$n = \sqrt{n_A n_B}$$

El valor de n para determinar los factores K_S y K_I para el cálculo de E_p , será el máximo de n_A y n_B .

$$n = \text{MAX} (n_A, n_B)$$

7.4 LONGITUD MÍNIMA DEL CONDUCTOR EN LA MALLA.

Puede desarrollarse una ecuación que permita determinar de manera preliminar, la cantidad de conductor necesaria para mantener el potencial de contacto bajo límites seguros.

De las ecuaciones 26, 27 y 31:

Para $E_m < E_{cont}$:

$$\frac{k_M k_I \rho^t G}{L} = (1000 + 15\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots 33$$

Ordenando la ecuación:

$$L = \frac{k_M k_I \rho^t G \sqrt{t_s}}{(116 + 174\rho_s)}$$

Similarmente para $E_m < E_{cont}$:

$$L = \frac{k_M k_I \rho^t G \sqrt{t_s}}{(157 + 0.235\rho_s)} \dots\dots\dots 34$$

CAPÍTULO 8

8. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

El diagrama de bloques de la figura 15 ilustra la secuencia para diseñar una malla de tierra.

Paso 1. DATOS DE CAMPO.

Área ocupada por la malla de tierra (A) y resistividad del terreno (ρ).

El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general del arreglo de la subestación, en el cual estarán indicados los límites y la disposición de equipos.

La resistividad del terreno podrá determinarse con alguno de los métodos indicados anteriormente o de datos promedio proporcionado por tablas.

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

Paso 2. DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR.

Cálculo de la corriente de falla. Tiempo de duración de la falla y diámetros de conductor de la malla.

El tamaño de conductor se determina con la ecuación 30. La corriente de falla podrá calcularse con las fórmulas descritas anteriormente y será la máxima que podrá conducir cualquier conductor en el sistema de tierra.

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

El diámetro del conductor de la malla se calculará a partir de la sección del conductor.

Paso 3. CALCULO DE POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO TOLERABLES.

Los voltajes de paso y de contacto tolerables se calcularán con las ecuaciones 24, 25, 26 y 27 descritas anteriormente.

La selección del tiempo t_s basado en el criterio del ingeniero de diseño apoyado en la norma.

Paso 4. DISEÑO INICIAL DE LA MALLA.

El diseño preliminar de la malla deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación además de conductores cruzados en dos direcciones formando una retícula para permitir la conexión a tierra de los diferentes equipos.

El espaciamiento entre conductores y la localización de varillas de tierra deberá basarse en la corriente y en el área a proteger con la malla.

Paso 5. RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA.

Puede determinarse un valor preliminar de la resistencia con las ecuaciones indicadas en el punto 3 de estas notas.

Para el diseño final pueden encontrarse estimaciones más precisas de esta resistencia, especialmente cuando se usan varillas para alcanzar capas de mayor conductividad en el subsuelo. Para esta aplicación se utilizarán las ecuaciones para incluir el efecto de dos diferentes resistividades en el cálculo de la resistencia de la red y del grupo de varillas.

Paso 6. CORRIENTE DE MALLA.

La corriente I_m se determinará por las ecuaciones estudiadas anteriormente. Para evitar un sobredimensionamiento del sistema de tierra, deberá usarse en el diseño de la malla solamente aquella parte de la corriente total de falla I_{f0} que fluye de la malla hacia el terreno (y que contribuye a los voltajes de paso y de malla, y a la elevación de potencial de la malla).

La corriente I_0 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 del potencial de la malla del diseño preliminar está por debajo del valor del voltaje de contacto tolerable, ya no es necesario realizar más cálculos, únicamente se agregarán si se requieren, conductores adicionales para puesta a tierra de equipos.

Paso 8. CÁLCULO DE POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO EN LA MALLA

Los potenciales de paso y de contacto en la malla, se calcularán con las ecuaciones descritas en los párrafos correspondientes.

Paso 9. COMPARACIÓN DEL POTENCIAL DE CONTACTO EN LA MALLA, CON EL POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE.

En este paso se compararán el potencial de contacto en la malla llamado también potencial de malla, con el potencial de contacto tolerable calculado en el paso 3

Si el potencial de malla es menor que el potencial de contacto tolerable, el diseño puede completarse (ver paso 10) y si no, tendrá que modificarse el diseño preliminar (ver paso 11).

Paso 10.

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

Paso 11.

Si se exceden los límites de los potenciales tolerables se requerirá de una revisión en el diseño de la malla.

Esta revisión incluirá espaciamientos más pequeños entre conductores, varillas de tierra adicionales, etc.

Paso 12. DETALLES EN EL DISEÑO.

Después de satisfacer los requerimientos para cumplir con los voltajes tolerables, deberá revisarse el diseño final para incluir conductores que hagan falta cerca de los equipos que se van a conectar a tierra, o adicionar varillas en las bases de los apartarrays o en los neutros de transformadores, etc.

	DATOS DE CAMPO (A, p)		PASO 1
	TAMAÑO DEL CONDUCTOR (3I _o , I _c , d)		PASO 2
	POTENCIALES DE PASO Y CONTACTO TOLERABLES (E _s , E _t)		PASO 3
	DISEÑO INICIAL DE LA MALLA (D, n, l, h)		PASO 4
	RESISTENCIA A TIERRA DE MALLA (R _g)		PASO 5
PASO 11	CORRIENTE DE MALLA (I _g)		PASO 6
DISEÑO MODIFICADO (D, n, L)	COMPARACIÓN DE POTENCIALES NO	SI	PASO 7
	POTENCIALES DE CONTACTO Y PASO DE LA MALLA (E _c , E _p , K _i , K _s , K _m)		PASO 8
NO	COMPARACIÓN DE POTENCIAL TOLERABLE CONTRA POTENCIAL DE MALLA (E _c <E _t)		PASO 9
	SI		
NO	(E _p <E _s)		PASO 10
	SI		
	DETALLE FINAL		PASO 12
	figura 15		

CAPÍTULO 9

9.0 APLICACIÓN PRÁCTICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO.

9.1 CÁLCULOS DEL ALMACÉN TEMPORAL Y DE COMBUSTÓLEO.

La memoria de cálculo de la red del sistema de tierras para las áreas del almacén de obras temporales y almacenamiento de combustóleo, es diseñada para la protección del personal y equipo que estén operando cuando se presenten condiciones de falla.

9.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El cálculo de la red del sistema de tierras es de acuerdo a las siguientes condiciones:

- a) El diseño de la red del sistema de tierras está en base a la norma IEEE 80 y O46000-EO-NW-008 de sicartsa.
- b) La longitud de la red de tierras se calculó, en base a la corriente de corto circuito de fase a tierra en las barras de 480 Volts del CCM del almacén de obras temporales (Ver Anexo1).
- c) La sección mínima transversal del conductor de la malla principal, esta determinada en base a la corriente de falla de una fase a tierra en el sistema de baja tensión, en el almacén de obras temporales.
- d) Los valores promedio de la resistividad del terreno son tomados del documento de Exploraciones Subterráneas y Asesoramiento Industrial, S.A.

9.3 DATOS

- a) Resistividad del terreno: $250\Omega\text{M}$, a una profundidad de 1 metro.
- b) ρ_s se considera el promedio del área de combustóleo: $3500\Omega\text{M}$
- c) Área del almacén de obras temporales y almacenamiento de combustóleo $A = 70 \times 100 = 7000 \text{ M}^2$.
- d) Corriente máxima de falla de fase a tierra en el sistema de baja tensión (480 V.): 9000 Amp.
- e) H = Profundidad a la que se enterrará el cable: 1.0 metros
- f) D = Espaciamiento entre los conductores de la malla, D = 10 metros.
- g) N = Número de conductores paralelos en una dirección, N = 8.

9.4 CÁLCULOS

9.4.1 DISEÑO PRELIMINAR PARA LA LONGITUD Y CONFIGURACIÓN DE LA RED DE TIERRAS (VER ANEXO 2), DE DONDE SE TIENE:

a) Longitud aproximada $L=1400$ metros.

b) Radio del círculo que tenga la misma área ocupada por la red de tierras(r).

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$r = \sqrt{\frac{7000}{3.1416}}$$

$$r = 47.20 \text{ metros}$$

c) Resistencia de la red con la longitud y configuración de la red.

$$R = \rho/4r + \rho/L$$

donde: ρ = Resistividad del terreno.

L = Longitud aproximada.

$$R = 250/4(47.20) + 250/1400$$

$$R = 1.50 \Omega$$

Donde: $1.50 < 5 \Omega$ solicitados por sicartsa

9.4.2 Para el cálculo del calibre del conductor de la malla principal se determinara:

Por la magnitud de la corriente y tiempo de flujo, basada en la elevación de temperatura máxima permisible, la cual será de 450°C , (conexiones soldables tipo cadweld), para el dimensionamiento de este conductor, se empleará la expresión de Onderdonk (VER ANEXO 3), que considera una temperatura inicial del conductor de 26°C y una elevación de 450°C .

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log_{10}\left(\frac{T_M - T_A}{234 + T_A}\right) + 1}{33S}}} \dots\dots\dots 1$$

- Donde: A= Sección transversal del conductor en circular-mils
 I= Corriente de falla a tierra
 S= Tiempo de flujo en segundos
 T_m=Temperatura máxima permisible:450°C.
 T_A=Temperatura ambiente del terreno:26°C.

9.4.2.1 Cálculo del calibre del conductor requerido para una falla en el sistema de baja tensión (480 V).

- a) Se considera una falla de fase a tierra máxima de 9000 Amp.
 b) Tiempo máximo de la falla 3 seg.

De la ecuación 1 tenemos que:

$$A = \frac{9000}{\sqrt{\frac{\log_{10}\left(\frac{450 - 26}{234 + 26}\right) + 1}{33(3)}}$$

A = 138461.53 circular mils

Este valor es equivalente a un conductor calibre N° 3/0 AWG. Por norma de sicartsa se usará calibre N° 4/0 AWG (ANEXO 1a y 10).

9.4.3 CÁLCULO DE LA LONGITUD Y CONFIGURACIÓN DE LA RED

La longitud del cable se calcula con la siguiente ecuación (VER ANEXO 4).

$$L = \frac{K_M K_I \rho G \sqrt{I_s}}{116 + 0.174 \rho_s} \dots\dots\dots 2$$

9.4.3.1 CÁLCULO DE LOS DIFERENTES PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN 2

a) Cálculo del coeficiente que toma en cuenta la geometría de la red de tierra (K_M) según la fórmula.

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \text{LN} \left(\frac{D^2}{16Hd} \right) + \frac{1}{\pi} \text{LN} \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \left(\frac{9}{10} \right) \dots \text{etc.} \quad (\text{VER ANEXO 4})$$

Donde: H=Profundidad de la malla: 1 metro.

D=Separación entre conductores de la malla: 10 M.

d=Diámetro de los conductores de la malla: 0.0134 M

El número del factor en paréntesis serán igual a N-2, por lo tanto N-2= 8-2=6.

$$k_M = \frac{1}{2\pi} \text{LN} \frac{10^2}{16 \times 1 \times 0.0134} + \frac{1}{\pi} \text{LN} \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \left(\frac{9}{10} \right) \left(\frac{11}{12} \right) \left(\frac{13}{14} \right)$$

$$k_M = (0.1591) (6.1450) + (0.3183) (-0.8705)$$

$$k_M = 0.9776 - 0.2770$$

$$k_M = 0.70$$

b) Cálculo del coeficiente de irregularidad = K_i

$$k_i = 0.65 + 0.172 (N)$$

$$k_i = 0.65 + 0.172 (8)$$

$$k_i = 2.02 \quad (\text{VER ANEXO 4})$$

c) $t=0.1$ seg. (Considerando que es el tiempo que tarda en abrirse el elemento magnetico del interruptor).

Sustituyendo estos valores en la ecuación 2 para el cálculo de la longitud, se tiene:

$$L = \frac{K_M K_I \rho_{CC} \sqrt{0.1}}{116 + 0.17 \rho_s}$$

$$L = 0.70 \times 2.02 \times 250 \times 9000 \times 0.31 / 116 + 0.17 \times 3500$$

$$L = 1390 \text{ metros.}$$

Conclusión: Según el diseño preliminar (VER ANEXO 2) la longitud de la malla es de 1400 M., y la calculada es de 1390 M por lo que se considera que el diseño original es el adecuado para el sistema de tierras.

9.4.4 CALCULO DE LAS TENSIONES TOLERABLES

a) Cálculo de la tensión de contacto (E_c).

La tensión de contacto tolerable (E_c) es aquella que puede sufrir una persona, en el momento de la falla estando en contacto con la estructura metálica y esta dada por la ecuación:

$$E_{c \text{ tolerable}} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{1}} \quad (\text{VER ANEXO 5})$$

$$E_{c \text{ tolerable}} = \frac{116 + 0.17(3500)}{\sqrt{0.1}}$$

$$E_{c \text{ tolerable}} = 2293.54 \text{ Volts.}$$

La ecuación para tensión de contacto probable en el momento de la falla está dada por la ecuación:

$$E_{c \text{ probable}} = K_M K_I \rho \frac{1}{L} \quad (\text{VER ANEXO 4})$$

$$E_{c \text{ probable}} = 0.70 \times 2.02 \times 250 \times 9000 / 1400$$

$$E_{c \text{ probable}} = 2280 \text{ Volts}$$

b) Cálculo de la tensión de paso (E_p).

Es la tensión que puede presentarse al caminar un individuo en el momento que ocurre una falla en el terreno natural y está dada por la ecuación:

$$E_{p\text{tolerable}} = \frac{116 + 0.7P_s}{\sqrt{t}} \quad (\text{VER ANEXO 5})$$

$$E_{p\text{tolerable}} = \frac{116 + 0.7(3500)}{\sqrt{0.1}}$$

$$E_{p\text{tolerable}} = 9277.4 \text{ Volts}$$

La tensión de paso probable entre los pies de una persona al dar un paso largo cuando está circulando la corriente máxima de falla de la red hacia la tierra está dada por:

$$E_p \text{ probable} = K_s K_1 \rho I / L \quad (\text{VER ANEXO 8})$$

Donde K_s es un coeficiente que toma en cuenta la geometría de la red y está dada por:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} + \frac{1}{5D} + \frac{1}{6D} + \frac{1}{7D} \right] \quad (\text{VER ANEXO 8})$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 1} + \frac{1}{10+1} + \frac{1}{2 \times 10} + \frac{1}{3 \times 10} + \frac{1}{4 \times 10} + \frac{1}{5 \times 10} + \frac{1}{6 \times 10} + \frac{1}{7 \times 10} \right]$$

$$K_s = 0.318(0.5 + 0.09 + 0.05 + 0.033 + 0.025 + 0.0166 + 0.0142)$$

$$K_s = 0.318 \times 0.7288$$

$$K_s = 0.231$$

Sustituyendo el valor de K_s tenemos:

$$E_p \text{ probable} = 0.231 \times 2.02 \times 250 \times (9000/1400) = 750 \text{ Volts.}$$

9.4.5 COMPARACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD CON EL DISEÑO DE 1390 METROS DE MALLA PRINCIPAL.

Si se cumple la condición de las siguientes fórmulas se comparará que la malla calculada es segura.

$$\frac{K_M K_1 \rho \sqrt{l}}{L} - 0.17 \rho_s < 116 \quad (\text{VER ANEXO 4})$$

$$\frac{0.7 \times 2.02 \times 250 \times 9000 \times 0.31}{1400} - 0.17 \times 3500 < 116$$

$$704.47 - 595 < 116$$

$$109.5 < 116$$

Por lo tanto se demuestra que la malla es segura.

9.4.6 Cálculo de la resistencia del grupo de varillas consideradas.

Se instalarán 27 varillas tipo copper-weld de 3 metros de longitud por 16 mm. de diámetro, espaciadas dentro de la malla principal con una separación de 20 metros promedio, obteniéndose puntos equidistantes, cumpliendo con la norma 046000-EO-NW-008 de Sicartsa (VER ANEXO 9).

Para determinar la resistencia de una varilla se aplicará la siguiente fórmula:

$$R = \rho \Omega \text{cm} / 302 \quad (\text{VER ANEXO 7})$$

Donde: R_1 = Resistencia de una varilla

ρ = Resistencia del terreno en $\Omega \cdot \text{cm}$

302 = Constante para varillas de 3 metros y 16 mm. de diámetro, según tabla N°8 del IEEE-STD 142-1982 (VER ANEXO 7).

$$R_1 = 25000 / 302 = 82.78 \Omega$$

Para el grupo de varillas

R_r = Resistencia para el grupo de varillas

R_1 = Resistencia de una varilla

N = Número de varillas

F = Factor de multiplicación (VER ANEXO 6)

$R = R_1 / N \times F$

$$R_v = 82.78 / 27 \times 2.2 = 6.74 \Omega$$

La resistencia total del sistema de tierras de la red principal y el grupo de varillas es igual a:

$$R_r = R \text{ malla} \times R \text{ varilla} / R \text{ malla} + R \text{ varilla}$$

$$R_r = 1.50 \times 6.74 / 1.50 + 6.74$$

$$R_r = 1.22 \Omega$$

CONCLUSIONES:

De los resultados obtenidos, en la memoria del cálculo podemos concluir los siguientes puntos:

a) La longitud total de la red será de 1400 metros, con 27 varillas copperweld de 3.0 metros de longitud y 16 mm. de diámetro.

b) Comparando la máxima elevación de tensión de la red (EC probable), con la máxima tensión tolerable del cuerpo (EC tolerable).

$$EC \text{ probable} < EC \text{ tolerable}$$

$$2280.0 < 2293.54 \text{ Volts}$$

Por lo tanto la malla de tierras es segura.

c) Comparando que la elevación de la tensión de paso será de malla (EP probable) es menor que la (EP tolerable).

$$EP \text{ probable} < EP \text{ tolerable}$$

$$750.0 < 8277.4 \text{ Volts}$$

Por lo tanto la malla es segura.

Se puede concluir que el sistema de tierras diseñado es seguro y no es necesario adoptar medidas especiales para reducir la resistencia del terreno.

ANEXOS

ANEXO 1

ÍNDICE

- 1.0 OBJETIVOS
- 2.0 CRITERIO DE DISEÑO
- 3.0 FÓRMULAS
- 4.0 DIAGRAMA UNIFILAR
- 5.0 DATOS
- 6.0 CÁLCULOS
- 7.0 CONCLUSIONES
- 8.0 ANEXOS

1.0 OBJETIVO

El presente estudio tiene como finalidad desarrollar el cálculo de la corriente de corto circuito simétrico de fase a tierra en las barras de 480 volts del CCM del almacén de obras temporales.

2.0 CRITERIO DE DISEÑO

El cálculo de corto circuito es basado en las siguientes consideraciones:

- a) Para el cálculo de la corriente de falla de tierra se utilizará el método que se indica en la norma IEEE-141.
- b) Los datos y diagrama unifilar, para el análisis del cálculo es indicado más adelante.
- c) La corriente de corto circuito de fase a tierra calculada servirá para determinar el diseño de la red de tierra.

3.0 FORMULAS

$$I_B = \frac{MVA_B}{\sqrt{3}KV_B}$$

Zpu de la red = MVAbase/MVAcorto circuito

Zpu linea = $Z \Omega \times MVAbase/KV^2$ linea

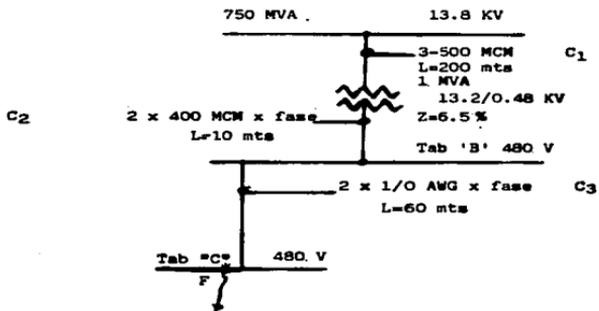
Zpu = $Z\% / 100$

Zpu transformador = $Zpu (MVAbase/MVAtransf.) \times (KV / Kvbase)^2$

Icc pu = $3E / Z_1 + Z_2 + Z_0$

Icc = Ibase x Icc pu

4.0 DIAGRAMA UNIFILAR



5.0 DATOS

El cálculo es basado con las consideraciones siguientes:

a) Nivel de corto circuito en 13.8 KV es igual a 750 mva.

b) La línea C₁ ,tiene tres cables.uno por fase de 500 MCM,el cual tiene los siguientes parámetros.

R= 0.0246 Ω /1000 ft

(VER ANEXO 1a)

X= 0.0839 Ω /1000 ft

c) La línea C₂ ,tiene seis cables, dos por fase de 400 MCM,el cual tiene los siguientes parámetros.

R= 0.0307 Ω /1000 ft
X= 0.0867 Ω /1000 ft
(VER ANEXO 1a)

d) La línea C₃ ,tiene seis cables,dos por fase de 1/0 awg,el cual tiene los siguientes parámetros.

R= 0.115 Ω /1000 ft
X= 0.103 Ω /1000 ft
(VER ANEXO 1a)

e) El transformador tiene las siguientes características.

Pot:1 MVA

Relación: 13.2/0.48 Kv

Impedancia:Z= 6.5%

6.0 CALCULOS

Para determinar el cálculo de corto circuito,es necesario referir todas las impedancias del sistema a una base común,para lo que se consideran los siguientes datos:

a) Sistema en 0.48 Kv.

MVA_{base}=1MVA

Kv_{base}=0.48 Kv

$$I_b = \frac{MVA_B}{\sqrt{3}KV_B}$$

$$I_b = \frac{1000 \text{KVAn}}{\sqrt{3}(0.48) \text{KV}} = 1202.84 \text{Amp.}$$

6.1 Cambiando todos los valores nominales a los valores base del sistema tenemos lo siguiente:

a) La impedancia del sistema es:

$$Z_{\text{sistema}} = \text{MVA}_{\text{base}} / \text{MVA}_{\text{cortocircuito}}$$

$$Z_s = 1/750 \text{ MVA} = 0.0013 \text{ pu}$$

$$\text{Donde } Z_1 = Z_2 = Z_0 = 0.0013 \text{ pu}$$

b) La impedancia de la línea C₁ .

Calculando la impedancia de la línea C₁ en ohms tenemos:

tres conductores de 500 MCM, uno por fase

$$R = 0.0246 \Omega / 1000 \text{ft} = 0.0246 \Omega / 304.8 \text{M} \times 1000 \text{ M} / 1 \text{ KM} = 0.0807 \Omega / \text{KM}$$

$$X = 0.0839 \Omega / 1000 \text{ft} = 0.0839 \Omega / 304.8 \text{M} \times 1000 \text{M} / 1 \text{ KM} = 0.2752 \Omega / \text{KM}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z = (0.0807)^2 + (0.2152)^2 = 0.2867 \Omega / \text{KM}$$

Considerando 200 metros = 0.2 KM de longitud

$$Z = 0.2867 \Omega / \text{KM} \times 0.2 \text{ KM} = 0.0553 \Omega$$

$$Z_{C_1} \text{ pu} = Z \Omega \times \text{MVA}_{\text{base}} / \text{KV}^2 \quad L = 0.0553 \times 1 \text{ MVA} / 13.8^2$$

$$Z_C \text{ pu} = 0.0002906 \text{ pu}$$

c) Impedancia del transformador de 1 MVA

$$Z_{pu} = Z\% / 100 = 6.5 / 100 = 0.065 pu$$

$$Z_{pu} = Z_{pu} \left(\frac{MVA_B}{MVA_{transf.}} \right) \left(\frac{KV_1}{KV_B} \right)^2 = 0.065 \left(\frac{1MVA}{1MVA} \right) \left(\frac{13.2}{13.8} \right)^2$$

$$Z_{pu} = 0.06 pu$$

$$\text{Donde: } Z_1 = Z_2 = Z_0 = 0.06 pu$$

d) Impedancia de la línea C₂

Calculando la impedancia de la línea C₂ en ohms tenemos:

2x400 MCM por fase, con una longitud de 10 M.

$$R = 0.0307 \Omega / 1000 ft = 0.0307 \Omega / 304.8 M \times 1000 M / 1 KM = 0.1107 \Omega / KM$$

$$X = 0.0867 \Omega / 1000 ft = 0.0867 \Omega / 304.8 M \times 1000 M / 1 KM = 0.2844 \Omega / KM$$

$$Z = \sqrt{(0.1107)^2 + (0.2844)^2} = 0.3017 \Omega / KM \text{ conductor}$$

Considerando 10 Metros de longitud : 0.01 KM

$$Z \Omega = 0.3017 \Omega / KM \times 0.01 KM = 0.003017 \Omega$$

$$Z C_{pu} = Z \Omega \times MVA_B / KV^2 = 0.003017 \times 1 / (0.48)^2 = 0.0131 pu$$

pero como son dos conductores tenemos:

$$Z C_{pu} = 0.0131 / 2 = 0.0066 pu$$

$$\text{Donde: } Z_1 = Z_2 = 0.0066 pu$$

e) Impedancia de la línea C₁

Calculando la impedancia de la línea C₁ en ohms, tenemos:

2 cables de 1/0 awg por fase, con una longitud de 60 metros.

$$R = 0.115 \Omega / 1000 ft = 0.115 \Omega / 304.8 M \times 1000 M / 1 KM = 0.3772 \Omega / KM$$

$$X = 0.103 \Omega / 1000 ft = 0.103 \Omega / 304.8 M \times 1000 M / 1 KM = 0.3379 \Omega / KM$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0.3772^2 + 0.3379^2} = 0.5064 \Omega / \text{KM por conductor}$$

Considerando 60 Metros = 0.06 KM de longitud

$$Z\Omega = 0.5064 \Omega / \text{KM} \times 0.06 \text{KM} = 0.0304 \Omega$$

$$Z_{C,pu} = Z\Omega \times MVA_n / KV^2 = 0.0304 \times 1 / 0.48^2 = 0.132 \text{ pu}$$

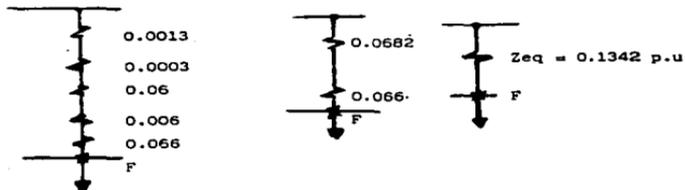
Como son dos conductores tenemos que:

$$Z_{C_1} = 0.132 / 2 = 0.066 \text{ pu}$$

Donde $Z_1 = Z_2 = 0.066 \text{ pu}$

6.2 Los diagramas de secuencia positiva, negativa y cero, para la corriente de corto circuito de falla a tierra son los siguientes:

a) Diagrama de secuencia positiva (+)



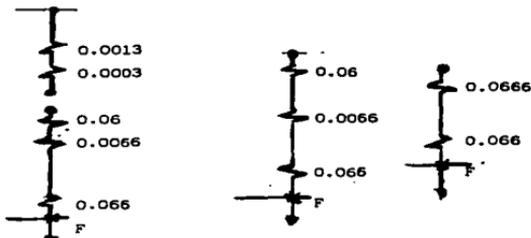
$$Z_{1eq} = 0.1342 \text{ pu}$$

b) Diagrama de secuencia negativa (-)

Es la misma que el diagrama de secuencia positiva

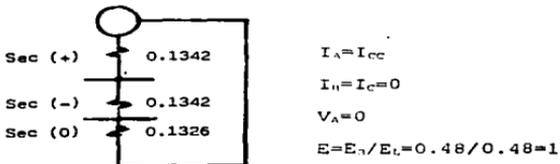
$$Z_{2eq} = 0.1342 \text{ pu}$$

c) Diagrama de secuencia cero (0)



$$Z_{0eq}=0.1326 \text{ pu}$$

d) Sacando la Z_{eq} , de los diagramas de secuencia (+), (-) y (0) tenemos lo siguiente:



$$I_{A1} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$I_{A1} = 3(1) / 0.1342 + 0.1342 + 0.1326 = 3 / 0.401 = 7.48 \text{ pu}$$

$$I_{CC} = I_{Bbase} \times I_{A1}$$

$$I_{CC} = 1202.84 \times 7.48$$

$$I_{CC} = 8997.24 \text{ Amp.} \cong I_{CC} = 9000 \text{ Amp.}$$

ANEXO 1a

CONSTANTES PARA LOS CONDUCTORES DE COBRE PARA UN ESPACIAMIENTO DE 1 PIE

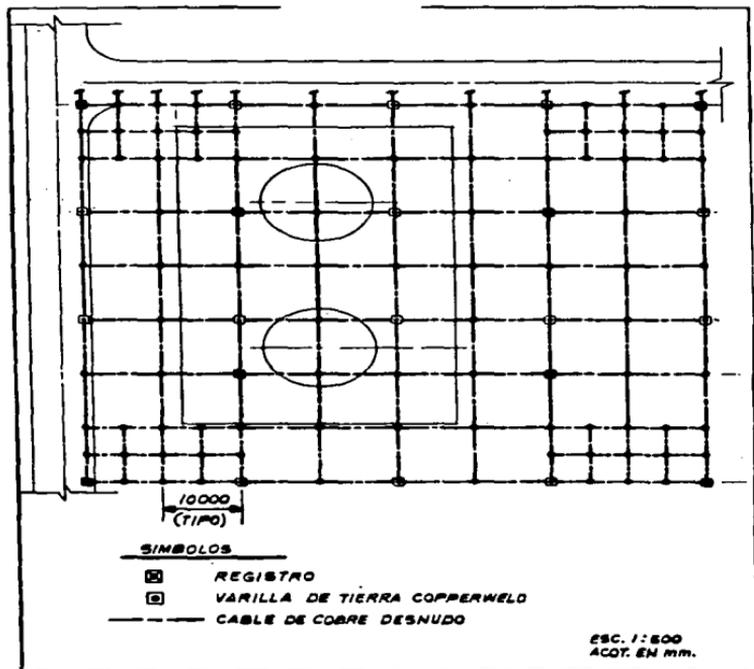
TAMAÑO DEL CONDUCTOR (CMIL)	CONDUCTOR (AWG)	RESISTENCIA R A50°C, 60HZ (Ω /COND/1000FT)	REACTANCIA Xa 1 Ft ESPACIO, 60HZ (Ω /COND/1000FT)
1000000		0.0130	0.0758
900000		0.0142	0.0769
800000		0.0159	0.0782
750000		0.0168	0.0790
700000		0.0179	0.0800
600000		0.0206	0.0818
500000		0.0246	0.0839
450000		0.0273	0.0854
400000		0.0307	0.0867
350000		0.0348	0.0883
300000		0.0407	0.0902
250000		0.0487	0.0922
211600	4/0	0.0574	0.0953
167800	3/0	0.0724	0.0981
133100	2/0	0.0911	0.101
105500	1/0	0.115	0.103
83690	1	0.145	0.106
66370	2	0.181	0.108
52630	3	0.227	0.111
41740	4	0.288	0.113
33100	5	0.362	0.116
26250	6	0.453	0.121
20800	7	0.570	0.123
16510	8	0.720	0.126

NOTA: Para un circuito de tres fases la impedancia total ,de línea a neutro,es:

$$Z=R+j(Xa+Xb)$$

ANEXO 2

DISEÑO PRELIMINAR PARA LA LONGITUD Y CONFIGURACIÓN DE LA RED DE TIERRAS.



ANEXO 3

TAMAÑO DEL CONDUCTOR DE TIERRA

Cada elemento del sistema de tierras (incluyendo la red propia, conexiones y electodos son designados como sigue:

- a) Resistir el fusiónamiento y el deterioro de juntas electricas bajo la más severa combinación de la corriente de falla y duración de la falla.
- b) Sea mecanicamente ásperos, para un alto grado especialmente en locales expuestos a daños físicos.
- c) Tener suficiente conductividad de suerte que no contribuya sustancialmente para locales peligrosos.

La eficiencia de un conductor de cobre y sus conexiones contra su fusiónamiento son determinadas por la tabla 111,0 por la ecuación siguiente desarrollada por ONDERDONK, por la cual la tabla es basada. Conexiones exotérmicas deben ser clasificados como cable unico:

$$I = A \sqrt{\frac{\text{LOG}_{10} \left(\frac{T_M - T_A}{234 + T_A} + 1 \right)}{33S}}$$

DONDE: I = Corriente total en amperes.

A = Sección del conductor de cobre en circular-mils

S = Tiempo en segundos cuando la corriente es aplicada

T_M = La temperatura máxima admisible en °C.

T_A = La temperatura ambiente en °C

las siguientes suposiciones son aplicadas normalmente en la ecuación:

Temperatura ambiente de 40°C

Todo el calor guardado en el conductor debido al corto tiempo de duración

Punto de fusión del cobre 1083°C

Temperatura admisible, conexiones soldadas 450°C

Temperatura admisible, conexiones atornilladas 250°C

TABLA III

TAMAÑO MÍNIMO DE CONDUCTORES DE COBRE PARA EVITAR FUSIONAMIENTO

TIEMPO DE DURACIÓN DE LA FALLA	COPPERWELD	CIRCULAR MILS POR AMP.		
	40% CABLE UNICO	CABLE UNICO	CONEXIÓN SOLDABLE	CONEXIÓN C/TORNILLO
30 SEGUNDOS	47	40	50	65
4 SEGUNDOS	17	14	20	24
1 SEGUNDO	8.5	7	10	12
0.5 SEGUNDO	6	5	6.5	8.5

ANEXO 4

LONGITUD DEL CONDUCTOR REQUERIDO PARA EL CONTROL DEL GRADIENTE

Una ecuación debe desarrollarse para permitir un cálculo aproximado del conductor de tierra necesario para tener los voltajes de contacto interior en el perímetro de la red dentro de límites seguros.

El voltaje de contacto es algo que paso o voltajes de transferencia, son usadas como las bases para la comparación siguiente:

a) Voltajes de paso encontradas en instalaciones practicas son usualmente pequeños que los voltajes de contacto; la resistencia de tierra entre los dos pies en serie es mejor que en paralelo y de este modo más efectivo en las limitaciones de la corriente en el cuerpo; así también el cuerpo debe de tolerar el camino de altas corrientes a través de un pie a otro.

b) Voltajes de transferencia son más difíciles para limitar y usualmente se requiere aislamiento o otro trato especial.

El voltaje de contacto para una estructura aterrizada en el centro de un rectángulo en la red de malla es usasdo. Algo que los voltajes de contacto sobre una distancia horizontal de un metro del alambre de tierra, puesto que hay muchas posibilidades que un objeto sea tocado, aun cuando el sitio este a una distancia de más de un metro deberá de ser conectado directamente o indirectamente a la red. Este caso especial de voltajes de contacto debe ser referido como un voltaje de malla. En general debe de ser un valor grande el voltaje de contacto y este a una distancia de un metro del conductor de tierra.

Por lo tanto la ecuación para calcular el voltaje de malla es:

$$E_{\text{malla}} = K_M K_1 p I / L \quad \dots\dots\dots 16$$

Donde: K_M = Es un coeficiente que acepta en cuenta el efecto del número N, espaciamiento D, diámetro d, y profundidad h, de la red de conductores.

K_1 = Es un factor de corrección de irregularidad, para permitir la corriente de tierra para diferentes partes de la red.

I= Es la máxima corriente total en amperes, fluida entre la red de tierras y el suelo.

ρ = Es la resistividad promedio del suelo en ohms-metro.

L= Es la longitud total del conductor enterrado en metros.

El cálculo del coeficiente que toma en cuenta la geometría de la red de tierra (K_M), se expresa como sigue:

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \text{LN} \frac{D^2}{16Hd} + \frac{1}{\pi} \text{LN} \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots \dots \dots \text{Etc.} \quad \dots \dots \dots 17$$

Donde: H= Profundidad de la malla

D= Separación de los conductores de la malla

d= Diámetro de los conductores de la malla

El número de factores en los parentesis mencionados arriba es el número de conductores paralelos en la red excluyendo el cruzamiento de las conexiones.

Si el valor para E_{malla} , dado por la ecuación 16 es igualada con el máximo valor tolerable dado por la ecuación 4 (Ver anexo 5), se tiene:

$$\frac{K_M K_I \rho I}{L} = \frac{116 + 0.17 \rho_g}{\sqrt{t}} \quad \dots \dots \dots 18$$

Por lo tanto, para la longitud aproximada L del conductor enterrado requerido para mantener el voltaje de malla en límites seguros se expresa:

$$L = \frac{K_M K_I \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho_g} \quad \dots \dots \dots 19$$

Donde:

ρ_g = Resistividad del terreno inmediatamente debajo del pie en ohm-metro, El poder aceptar el tratamiento de la superficie (capa de roca triturada), hace diferente la resistividad que estando el terreno natural.

t=Tiempo máximo de la falla, en segundos.

Para el cálculo del coeficiente de irregularidad (K_i), se tiene:

$$K_i = 0.65 + 0.172 N$$

Donde: N= Es el número de conductores de la red en paralelo en una dirección excluyendo conexiones cruzadas.

CONDICIONES EXISTENTES DE SEGURIDAD EN LA MALLA.

Las condiciones existentes deben ser seguras y considerando los gradientes internos pequeños en una malla se tiene lo siguiente:

$$\frac{K_M K_i \rho_s \sqrt{I}}{L} - 0.17 \rho_s < 116$$

Donde:

K_M =Es un coeficiente que acepta en cuenta el efecto del número N, espaciamiento D, diámetro d, y profundidad h, de la red de conductores.

K_i =Es un factor de corrección de irregularidad, para permitir la corriente de tierra para diferentes partes de la red.

I=Es la máxima corriente total en amperes, fluída entre la red de tierras y el suelo.

ρ_s =Es la resistividad promedio del suelo en ohms-metro.

L=Es la longitud total del conductor enterrado en metros.

t=Tiempo máximo de la falla en segundos.

ρ_s =Es la resistividad promedio del area en ohms-metro.

Para los diferentes términos, el ingeniero debe usualmente contraasegurarse el mismo completamente rapido en considertar la mayor parte de las condiciones en el sistema, y experto en dedicarse en cuestiones detalladas para los problemas que se lleguen a presentar en el estudio.

ANEXO 5

TENSIONES TOLERABLES DE PASO Y CONTACTO

Ya que es necesario para limitar la corriente del cuerpo, a un valor de miliamperes, y puesto que las corrientes de falla las cuales son de importancia es expresada en cientos, ó probablemente en miles de amperes. Podemos descuidar y cambiar el voltaje preexistido por razones de la corriente desviada a través del cuerpo.

De este modo asumimos que la diferencia de potencial total existente anterior al contacto se desea eliminar ésta fuerza de corriente a través del camino donde se incluye el cuerpo, substituyendo apropiadamente las constantes del circuito, y la expresión para la corriente tolerable, la diferencia de potencial tolerable entre dos puntos la cual esta contactada simultaneamente es:

$$E_{paso} = (R_K + 2R_F)(I_K)$$

$$E_{paso} = (1000 + 6\rho_S) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$E_{paso} = \frac{116 + 0.7\rho_S}{\sqrt{t}} \quad (\text{volts}) \quad \dots\dots\dots 3$$

$$E_{contacto} = \left[R_K + \frac{R_F}{2} \right] (I_K)$$

$$E_{contacto} = (1000 + 1.5\rho_S) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$E_{contacto} = \frac{116 + 0.17\rho_S}{\sqrt{t}} \quad (\text{volts}) \quad \dots\dots\dots 4$$

Donde: Epaso= Es la diferencia de potencial tolerable entre dos puntos y la superficie de la tierra, donde debe ser tocada simultaneamente por ambos pies.

Econtacto=Es la diferencia de potencial entre dos puntos y la tierra, donde una persona pueda resistir en cualquier punto, el cual sea tocado simultaneamente por ambas manos.

ANEXO 6

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A TIERRA

La resistencia a tierra debe ser calculada y medida y el cálculo debe ser simplificado para una gran extensión de la red.

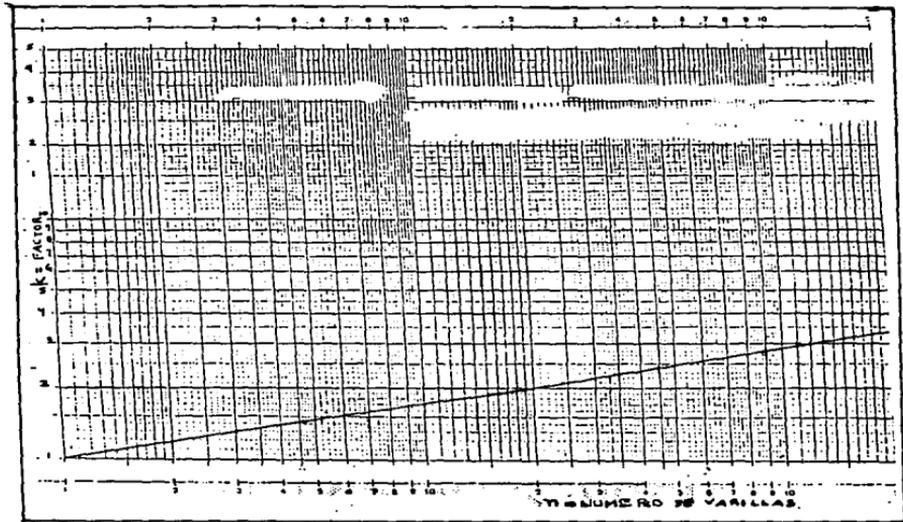
Si se tienen múltiples electrodos en paralelo producen baja resistencia en el suelo que un simple electrodo. Se utilizan múltiples varillas para producir baja resistencia en la instalación.

Una útil regla es que el sistema de tierras de 2-24 varillas colocada en una longitud aparte en una línea, triángulo, círculo o cuadrado, suministra una red de tierra igual a la resistencia de una varilla dividida por el número de varillas y multiplicada por el factor F tomado de la tabla siguiente:

NÚMERO DE VARILLAS	F
2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

FACTOR MULTIPLICATIVO PARA MÚLTIPLES VARILLAS

EXTRAPOLACIÓN DE DATOS MOSTRADOS EN LA TABLA 9 DEL IEEE
 STD.142-1982 DEL FACTOR K CONTRA EL NÚMERO DE VARILLAS N



ANEXO 7

FORMULAS PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE LA TIERRA. LAS DIMENSIONES DEBEN SER EN CENTIMETROS Y LA RESISTENCIA EN OHMS.

	Hemisphere radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
\bullet	One ground rod length L , radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
$\bullet \bullet$	Two ground rods $s > L$, spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
$\bullet \bullet$	Two ground rods $s < L$, spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
—	Buried horizontal wire length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
L	Right-angle turn of wire length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2148 \frac{s}{L} + 0.1036 \frac{s^2}{L^2} - 0.0426 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
人	Three-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.208 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.084 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
+	Four-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
*	Six-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
* *	Eight-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
○	Ring of wire diameter of ring D , diameter of wire d , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	Buried horizontal strip length $2L$, section a by b , depth $s/2$, $b < a/8$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - 2ab}{2(a+b)} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
⊗	Buried horizontal round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{29}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$
⊗	Buried vertical round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 + \frac{7}{36} \frac{a^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

ρ =RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN OHM-CENTIMETRO
 PARA VARILLAS DE 10 FT (3 M) DE 1/2, 5/8 Y 3/4 DE PULGADA
 (12.7, 15.88 Y 19.05 MM.), DE DIÁMETRO. LA RESISTENCIA DE UNA
 VARILLA DEBE SER DETERMINADA DIVIDIENDO LA RESISTENCIA DEL
 TERRENO ρ (Ω -CM.) ENTRE 292, 302 Y 311 RESPECTIVAMENTE.

ANEXO B

TENSION DE PASO

La tensión de paso entre los dos pies de una persona al dar un paso largo cuando está circulando la corriente máxima de falla de la red hacia la tierra esta dada por:

$$E_p = K_s K_i \rho I / L \quad \dots\dots 21$$

Donde:

K_s = Es un coeficiente que acepta en cuenta el efecto del número N, el espaciamiento D, y la profundidad h, de los conductores de tierra.

K_i = Es un factor de corrección de irregularidad, para permitir la corriente de tierra para diferentes partes de la red.

ρ = Es la resistividad promedio del suelo en ohm-metro.

I = ES la máxima corriente total en amperes, fluida entre la red de tierras y el suelo.

L = Es la longitud total del conductor enterrado en metros

El cálculo del coeficiente que toma en cuenta la geometría de la red (K_s), se expresa como sigue:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} + \dots\dots\dots \text{Etc.} \right]$$

Donde:

H = Profundidad de la malla

D = Separación de los conductores de la malla

El número total de terminos dentro del paréntesis es igual al número de conductores paralelos en la red, excluyendo el cruzamiento de las conexiones.

ANEXO 9

DISEÑO FINAL PARA LA LONGITUD Y CONFIGURACIÓN DE LA RED DFE TIERRAS



SIMBOLOS

- VARILLA DE CONEXION A TIERRA CON REGISTRO
- VARILLA DE CONEXION A TIERRA SIN REGISTRO
- CABLE DE COBRE DESNUDO
- CONEXION SOLDABLE DE CABLE A CABLE

CONCLUSIONES

El análisis realizado en este trabajo da un panorama amplio para afirmar que el estudio del sistema de tierras y cortocircuito es muy importante en un sistema eléctrico, ya que nos ayuda a lograr una mayor continuidad en el servicio.

La protección contra sobretensiones tanto en las subestaciones eléctricas, como en áreas de producción, será mediante una red de tierras adecuada, para proporcionar un circuito de muy baja impedancia por la circulación de las corrientes de tierra debidas por una falla y evitar que durante la circulación de estas corrientes puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos del sistema que puedan ser peligrosos para el personal.

En este trabajo se llevo a acabo el estudio para una área de combustóleo de acuerdo a las normas mencionadas.

El principio fundamental de la protección contra fallas a tierra es el de proporcionar el medio adecuado para el cual ocurra una falla, ésta puede incidir con seguridad sobre un elemento adecuado y sea conducida en forma inofensiva hasta un medio de dispersión enterrado bajo el nivel de piso terminado, de manera que no origine ó cause daños al personal y equipo, durante un recorrido y sea origen de otras fallas en el sistema.

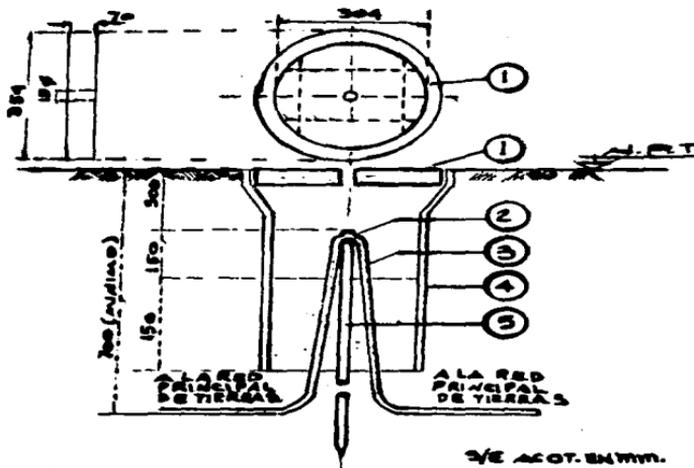
Esto influye positivamente en la eficiencia de operación del sistema eléctrico y en la productividad de la planta.

BIBLIOGRAFIA

1. ANSI/IEEE Std. 80-1986
IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
2. ANSI/IEEE Std. 142-1982
IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems
3. Tutorial Course 86 EHO253-5-PWR
Practical Applications of ANSI/IEEE Std. 80-1986
Guide for Safety
4. A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM
J.C.MAXWELL
5. EARTH CONDUCTION EFFECTS ON TRANSMISSION
E.D. SUNDE
6. HAZARDS OF ELECTRIC SHOCK AT STATIONS DURING AND METHOD OF
REDUCTION
A. ELECK
7. MANUAL ON GROUND RESISTENCE TESTING
JAMES G. BIDDLE
8. SIZING OF GROUND CONDUCTORS AGAINST FUSLING
J.C.SEVERAK
9. STUDY OF DRIVEN GROUND RODS AND FOUR POINTS SOIL RESISTIVITY
TESTS
C.J.BLATTNER

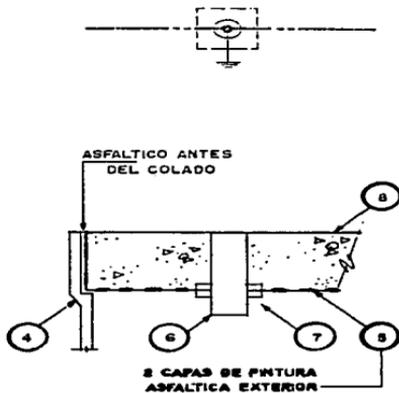
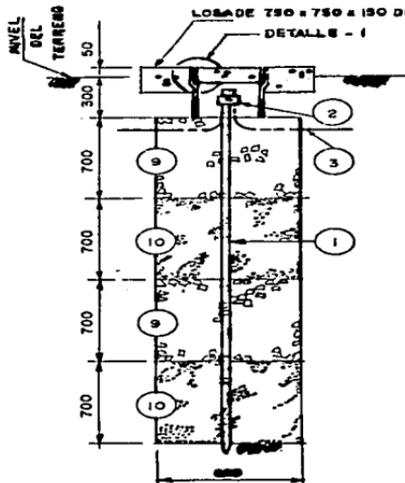
APÉNDICE A

REGISTRO CON VARILLA COPPERWELD



PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	TAPA REFORZADA DE CONCRETO	
2	CONEXIÓN SOLDABLE DE PASO, CABLE VARILLA DE TIERRA TIPO GT Ó GR.	CADWELD
3	CABLE DE COBRE DESNUDO, SEMIDURO CALIBRE REQUERIDO	CONDUMEX
4	TUBO DE ARCILLA VITRIFICADA DE 304mm DE ϕ x600mm DE LONG. CON CAMPANA Y TAPA	
5	VARILLA DE TIERRA TIPO COPPER WELD DE 3m. DE LONG. X 16mm ϕ	CADWELD

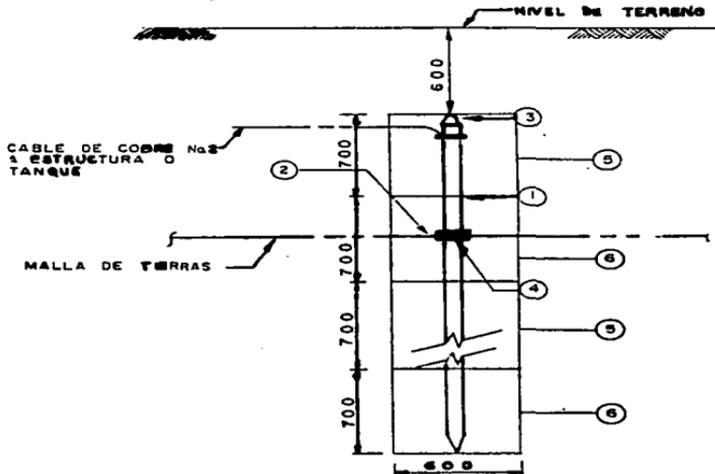
REGISTRO CON VARILLA COPERWELD Y CAPAS DE MATERIALES
 LOSA DE 750 x 750 x 150 DE PERALTE EN SUPERFICIES NO PAVIMENTADAS



DETALLE - I

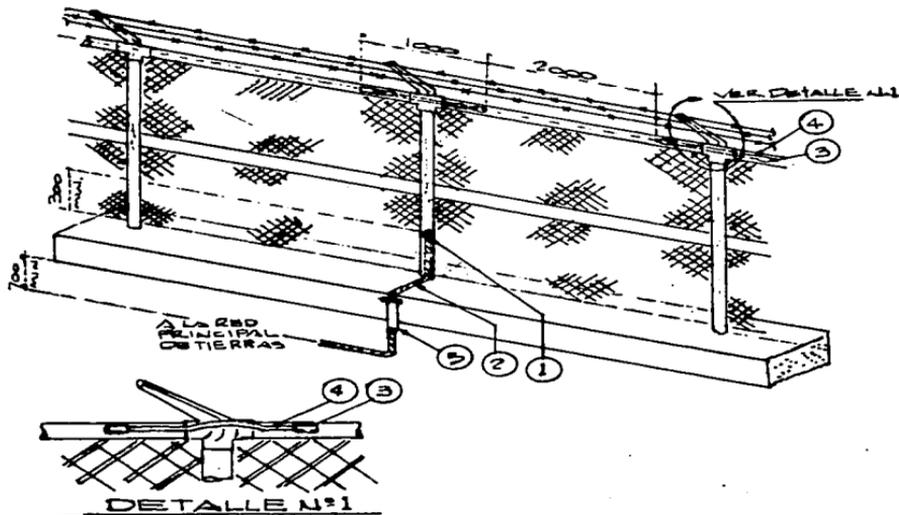
PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	VARILLA DE TIERRA TIPO COPERWELD DE 3 m. LONG. X 16 mm. ϕ	CADWELD
2	CONECTOR MECANICO CAT.1129	BURNDY
3	CABLE DE COBRE DESNUDO, SEMIDURO CALIBRE REQUERIDO	CONDUMEX
4	TUBO DE ARCILLA VITRIFICADA DE 304 mm. ϕ x 600mm. DE LONGITUD CON CAMPANA Y TAPA.	
5	PLACA ANTIDERRRAPANTE DE 1/4"X15"	
6	NIPLE DE TUBO CONDUIT DE 1 1/4"X6"	
7	CONTRATUERCA DE 1 1/4"	
8	CONCRETO	
9	CAPA DE CARBÓN	
10	CAPA DE SAL EN GRANO	

INSTALACIÓN CON VARILLA COPPERWELD. Y SALIDA A ESTRUCTURA



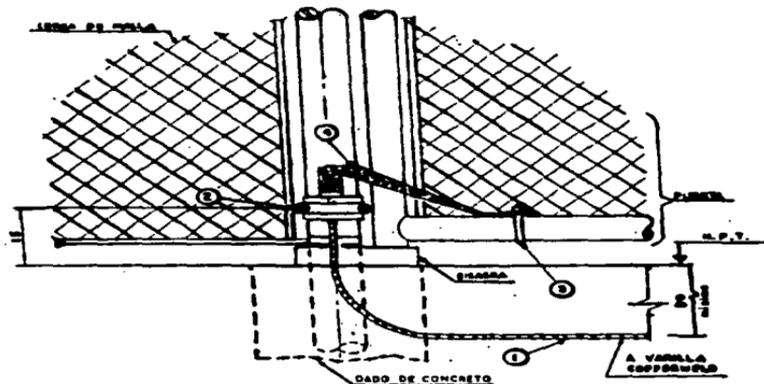
PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	VARILLA COPPERWELDDDE 3.05m. LONG POR 16 mm. ϕ	CADWELD
2	CABLE DE COBRE DESNUDO, SEMIDURO CALIBRE REQUERIDO	CONDUMEX
3	CONECTOR MECÁNICO CAT. GKP632W	BURNDY
4	CONECTOR MECÁNICO CAT. GAR-1129	BURNDY
5	CAPA DE CARBÓN	
6	CAPA DE SAL EN GRANO	

CONEXIÓN DE MALLA CICLONICA AL SISTEMA DE TIERRAS



PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	CONEXIÓN SOLDABLE DE CABLE A TUBERÍA VERTICAL TIPO V PARA CABLE CAL. MÍNIMO 2/0 AWG.	CADWELD
2	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. MÍNIMO 2/0 AWG.	CONDUMEX
3	CONEXIÓN SOLDABLE DE CABLE HORIZONTAL A TUBO HORIZONTAL TIPO VG PARA CAL.2 AWG	CADWELD
4	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL.2 AWG	CONDUMEX
5	NIPLE CONDUIT GALV. DE 300mm LONG. x 13mm. φ CON MONITOR.	

CONEXIÓN DE PUERTA DE ACCESO AL SISTEMA DE TIERRRAS

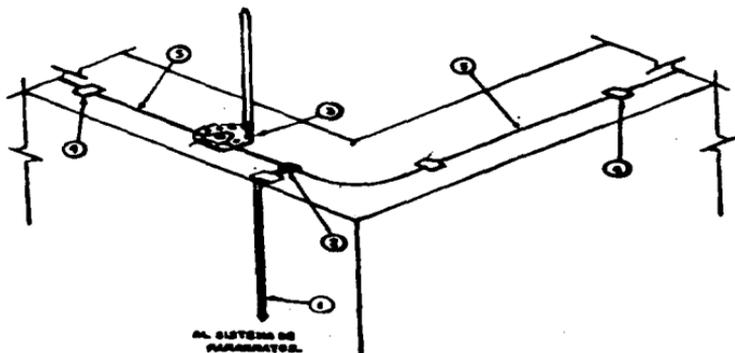


SIN ESCALA.

ACOTACIONES EN cm.

PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. MIN. 2/0 AWG.	CONDUMEX
2	CONECTOR SOLDABLE DE CABLE A TUBO HORIZONTAL TIPO HA	CADWELD
3	CONECTOR MECÁNICO PARA UNIR TRENCILLA FLEXIBLE A TUBO.	BURNDY
4	TRENCILLA FLEXIBLE, DE COBRE ESTANADO	

CONEXIÓN DE PUNTA DE PARARRAYOS EN AZOTEA

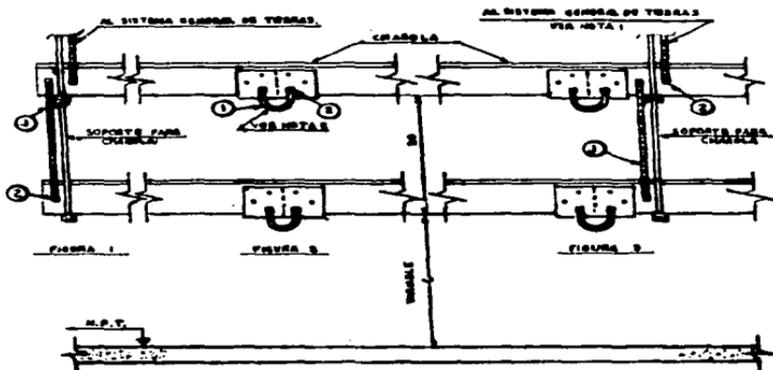


SIN ESCALA.

ACOTACIONES EN cm.

PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	CABLE DE COBRE DE COBRE SEMIDURO CAL. 2/0 AWG.	CONDUMEX
2	CONECTOR MECANICO BIPARTIDO PARA DERIVACIÓN DE COBRE PARA CONECTAR CABLES DE CAL. 2/0 A 1/0 AWG.	BURNDY
3	PUNTA DE PARARRRAYOS DE COBRE NIQUELADO, DE 300mm DE LONG. CON BASE PLANA.	
4	ABRAZADERA PARA CABLE EN SUPERFICIE PLANA DE COBRE	
5	CABLE DESNUDO DE COBRE SUAVE PARA PARARRRAYOS CON CÁLIBRE DE 45mm.	

CONEXIÓN A TIERRA PARA CHAROLA DE FIERRO GALVANIZADO



NOTAS.-

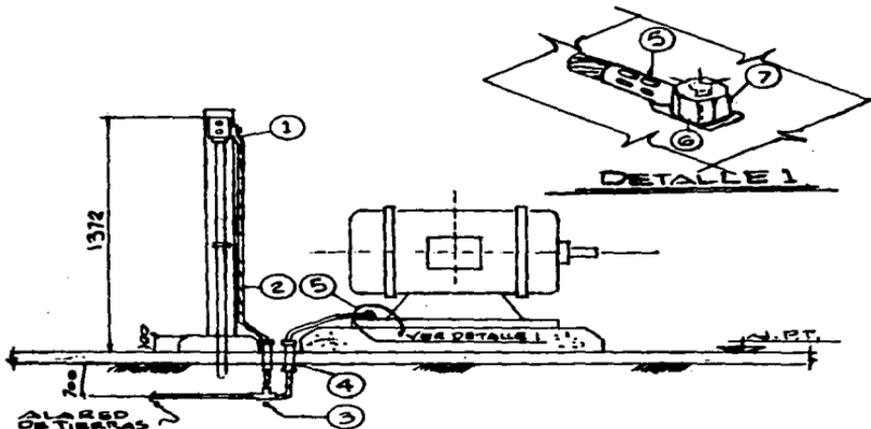
- 1.- ESTA CONEXIÓN DEBERÁ HACERSE A CADA 50 M. MÁXIMO.
 - 2.- ESTA CONEXIÓN DEBERÁ HACERSE A CADA UNO DE LOS LADOS.
 - 3.- LAS CONEXIONES SE HARÁN EN UN SOLO LADO DE LA CHAROLA.
- DE ESCALA.

ASOCIACIONES DE IN.

PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. 2 AWG.	CONDUMEX
2	CONECTOR DE COBRE DE COMPRESIÓN TIPO TERMINAL	BURNDY

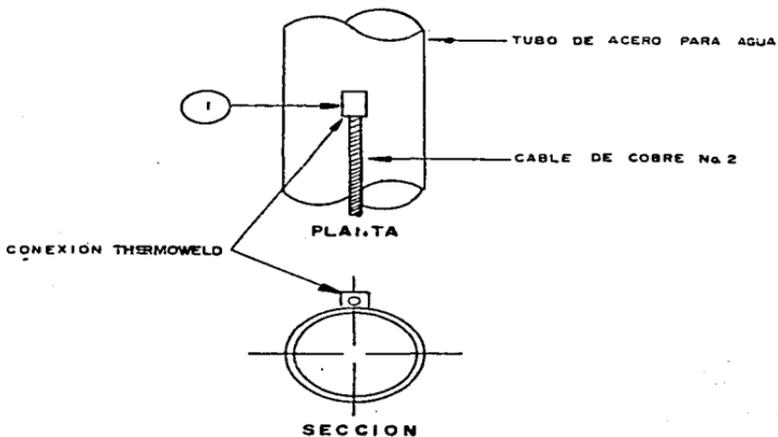
SI LA CHAROLA ES DE ALUMINIO SE UTILIZARA CONECTOR DE BRNCE

CONEXIÓN DEL MOTOR CON ESTACIÓN DE BOTONES AL SISTEMA DE TIERRAS



PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	CONECTOR MECÁNICO TERMINAL TIPO QA-B CON TORNILLO P/CAL. 6 AWG.	BURNDY
2	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. MINIMO 6 AWG.	CONDUMEX
3	CONEXIÓN SOLDABLE DE CABLE A CABLE TIPO PC	CADWELD
4	NIPLE CONDUIT GALV. DE 19mm ϕ X 300mm DE LONG. CON MONITOR	
5	CONECTOR ZAPATA TERMINAL DE PRESIÓN TIPO YA	BURNDY
6	JGO. DE ROLDANA PLANA Y DE PRESIÓN DE FIERRO GALV.	
7	TUERCA HEXAGONAL DE FIERRO GALV.	

CONEXION DE TUBERIAS AEREAS DE AGUA



PART

DESCRIPCION

MARCA

1

CONEXION THERMOWELD TIPO CCI

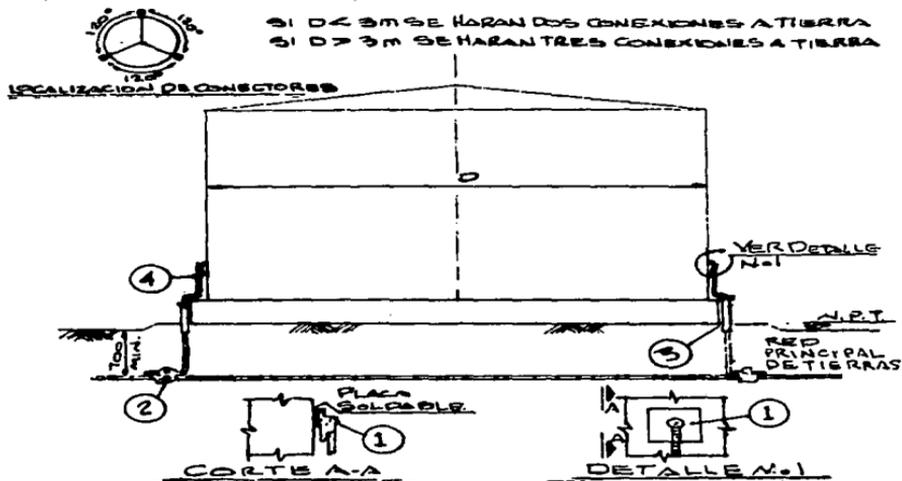
BURNDY

2

CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO
CAL. 2 AWG.

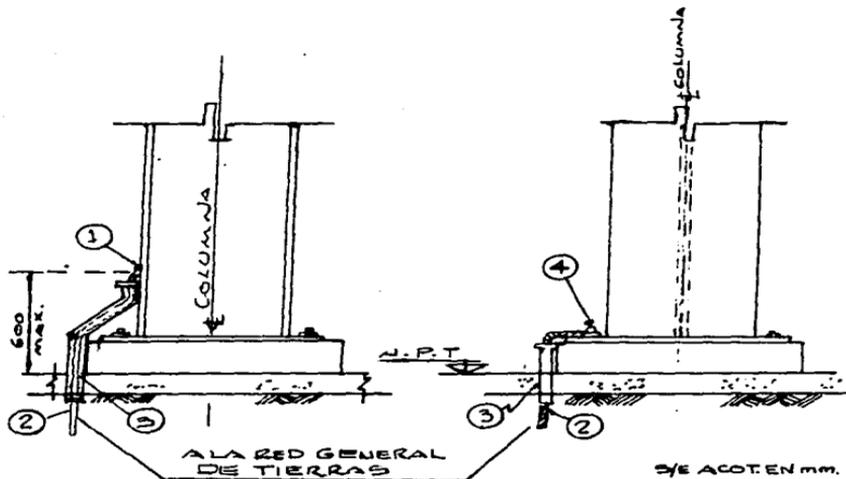
CONDUMEX

CONEXION DE RECIPIENTES VERTICALES AL SISTEMA DE TIERRA



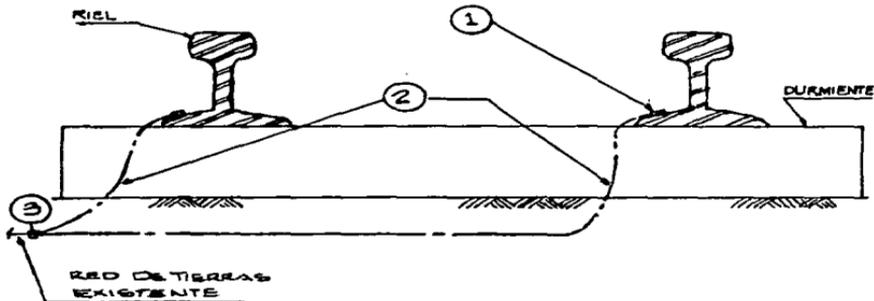
PART	DESCRIPCION	MARCA
1	CONEXION SOLDABLE DE PLACA DE ACERO TIPO HA CABLE CAL. MINIMO 2 AWG.	CADWELD
2	CONEXION SOLDABLE DE CABLE A CABLE TIPO PC	CADWELD
3	NIPLE CONDUIT GALV. DE 300 mm LONG. POR 19 mm ϕ CON MONITOR	
4	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. MINIMO 2 AWG.	CONDUMEX

CONEXION A TIERRA DE COLUMNAS



PART	DESCRIPCION	MARCA
1	CONEXION SOLDABLE TIPO VS PARA CABLE CAL. 2/0 AWG.	CADWELD
2	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. 2/0 AWG.	CONDUMEX
3	NIPLE CONDUIT GALV. DE 19 mm ϕ X 300mm LONG. CON MONITOR	
4	CONEXION SOLDABLE DE CABLE A PLACA HORIZONTAL TIPO HS PRA CAL. 2/0 AWG.	CADWELD

CONEXIÓN DE RIELES AL SISTEMA DE TIERRA

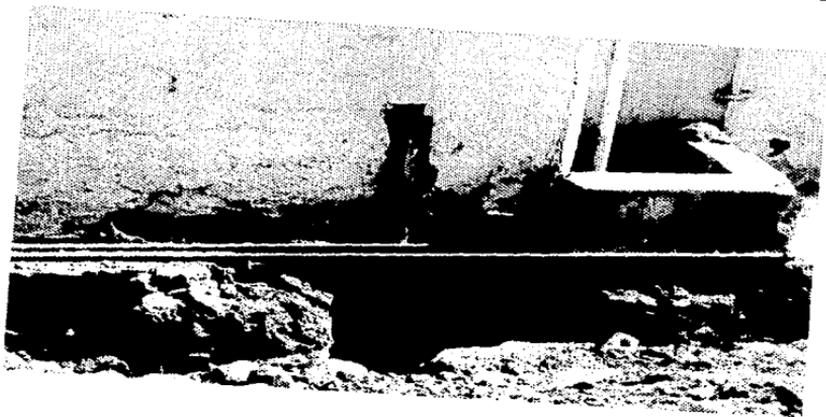
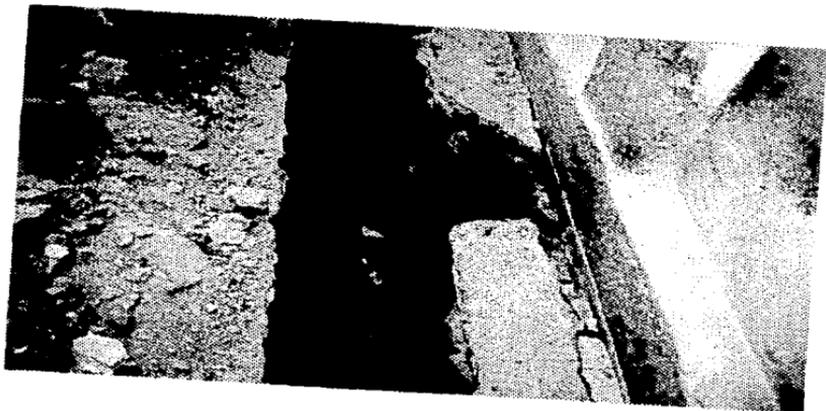


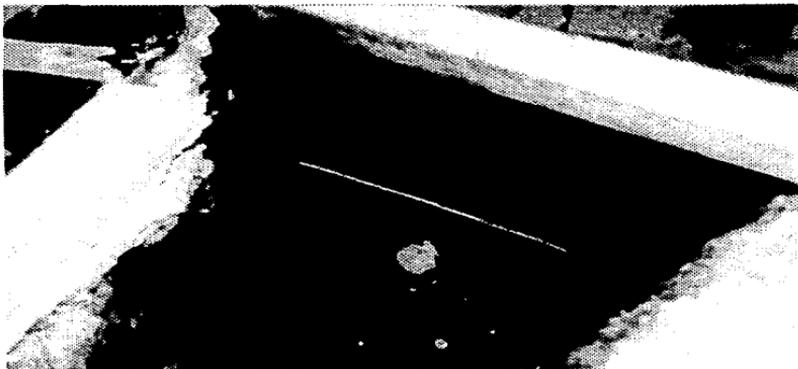
PART	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	CONEXIÓN SOLDABLE DE CABLE A RIEL TIPO RX PARA CABLE CAL. 2/0 AWG.	CADWELD
2	CABLE DE COBRE DESNUDO SEMIDURO CAL. 2/0 AWG.	CCNDUMEX
3	CONEXIÓN SOLDABLE DE CABLE A CABLE TIPO PC	CADWELD

APÉNDICE B

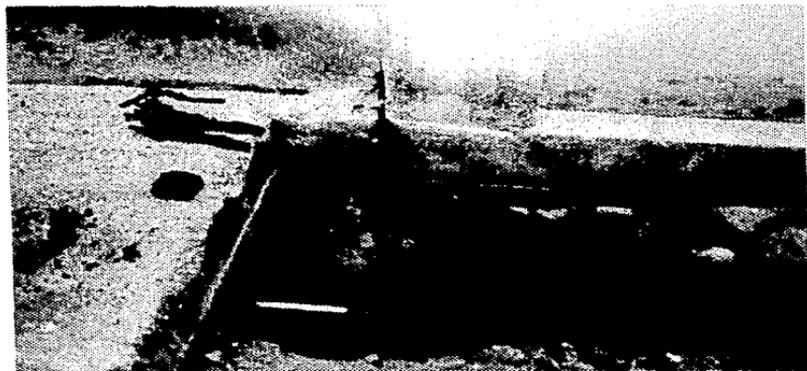






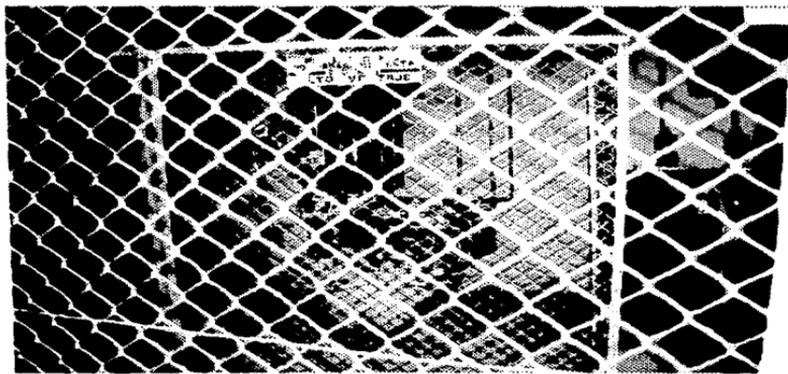












Otro tipo de conexiones disponibles:



SV



TV



PC



PT



YL-VL



RB



RA



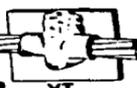
CM



CN



VG



VT



JV



LM-LR



VP



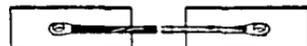
HB



HC



HT



VP



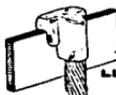
VN



LB



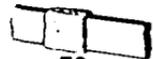
LW



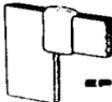
LL-LB



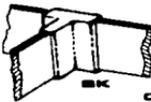
FN



SA



EP



BK



CC



C-BOND



PD



PF



RM

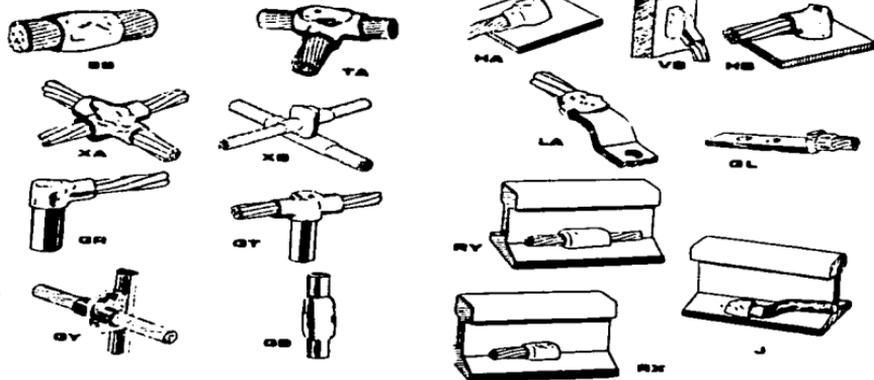


RR

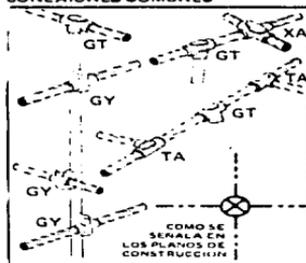


RD

TIPO DE CONEXIONES

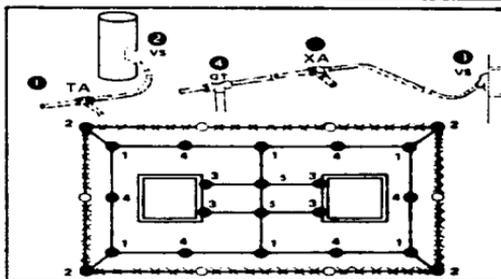


CONEXIONES COMUNES



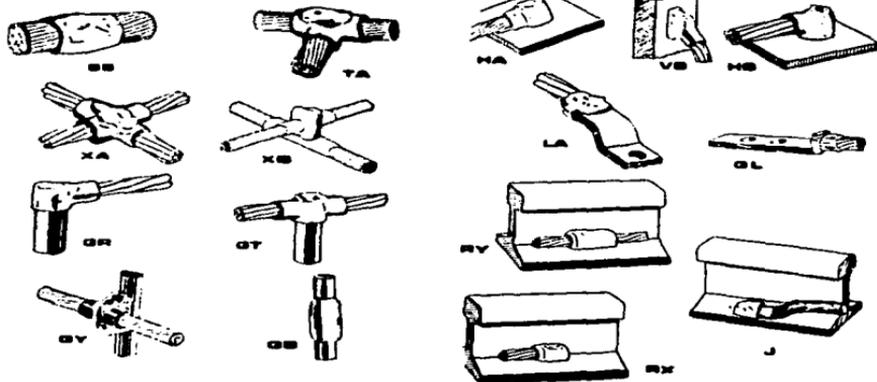
CONEXIONES A VARILLA DE TIERRA

CUANDO EN UN PLANO DE CONSTRUCCION SEÑALAN LAS VARILLAS A TIERRAS SE PUEDEN UTILIZAR TODOS LOS TIPOS ARRIBA MOSTRADOS.

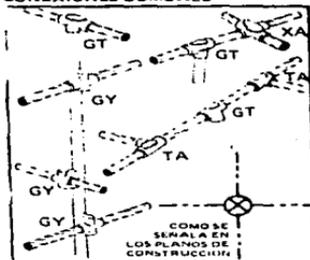


LAS CONEXIONES MAS COMUNES, EN UNA SUBESTACION, SON LAS MOSTRADAS ARRIBA (TA, VS, GT, XA).

TIPO DE CONEXIONES

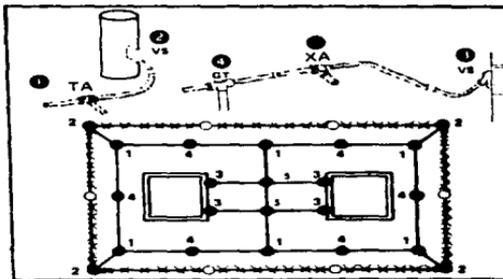


CONEXIONES COMUNES



CONEXIONES A VARILLA DE TIERRA

CUANDO EN UN PLANO DE CONSTRUCCION SEÑALAN LAS VARILLAS A TIERRAS SE PUEDEN UTILIZAR TODOS LOS TIPOS ARRIBA MOSTRADOS.



LAS CONEXIONES MAS COMUNES, EN UNA SUBSTACION, SON LAS MOSTRADAS ARRIBA (TA, VS, GT, XA).