

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**VALORES PERMISIBLES DE RESISTENCIAS DE PUESTAS
A TIERRA DE PROTECCIÓN EN REDES ELECTRICAS**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

**VICTOR ARTURO HIPÓLITO ALCALÁ
PROMOCIÓN
1989 - I**

**LIMA – PERÚ
2008**

**VALORES PERMISIBLES DE RESISTENCIAS DE
PUESTAS A TIERRA DE PROTECCIÓN EN REDES
ELÉCTRICAS.**

Dedicatoria.

Dedico el presente informe de suficiencia a Dios por ser el creador del universo.

SUMARIO

En todo sistema eléctrico es importante la puesta a tierra y adecuado sistema de protección; para garantizar continuidad en el servicio prestado a los usuarios y también garantizar la seguridad personal y a los equipos de la instalación.

El presente trabajo de suficiencia tiene por finalidad conocer los valores permisibles de resistencias de puesta a tierra de protección en redes eléctricas para que sirvan de información a interesados en el tema.

Las puestas a tierra en baja tensión esta generalizado con electrodo vertical pero también puede ser horizontal o de cualquier otra forma conocida cuando el terreno así lo amerite. Se dan a conocer los valores permisibles de puestas a tierra para diferentes usos y también se explican como obtener valores adecuados, durabilidad y formas constructivas.

Las puestas a tierra en subestaciones de potencia se realizan con malla o reticulado y en subestaciones de distribución con electrodo vertical. Se dan a conocer los valores permisibles de resistencia de puesta a tierra dependiendo de la potencia de la subestación mostrando el proceso de cálculo y la ejecución del mismo.

Las puestas a tierra en líneas de transmisión tienen una preferencia por los contrapesos o electrodos horizontales dependen de la zona, geografía y el clima de la ubicación. Se dan a conocer los valores permisibles de resistencias de puesta a tierra y el proceso de ejecución.

INDICE

Pág.

PRÓLOGO

CAPITULO I	3
FUNDAMENTO TEÓRICO DE UNA PUESTA A TIERRA	3
1.1.- EL PROCESO DE CONDUCCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL SUELO CONDUCTOR	3
1.2.- LA DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA PARA UNA PUESTA A TERRA	4
1.3.- EL POTENCIAL DE REFERENCIA CERO	5
1.4.- EL POTENCIAL PRODUCIDO POR LA INYECCIÓN DE CORRIENTE EN UN ELECTRODO	6
1.5.-EL PRINCIPIO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL	8
1.6.- EL PROPÓSITO DE UNA PUESTA A TIERRA	9
CAPITULO II.	10
FUNDAMENTOS DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA TIERRA	10
2.1- ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	10
2.1.1.-CONDUCTORES	10
2.1.2.-ELECTRODOS	10
2.1.3.-CONECTORES Y ACCESORIOS	11
2.1.4.- CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE CORRIENTE DE FALLA	12
2.2.-TIPOS DE PUESTA A TIERRA	12
2.2.1.-ATERRAMIENOS DE SEGURIDAD	13
2.2.2.-ATERRAMIENOS FORMALES	13

2.3.-COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SUELO	13
2.4.-RESISTIVIDAD	13
2.4.1.-RESISTIVIDADES REFERENCIALES DE LOS SUELOS	13
2.4.2.-GRADO DE HUMEDAD DEL TERRENO	14
2.4.3.-LA TEMPERATURA	15
2.4.4.-EL GRADO DE COMPACTACIÓN DEL SUELO	16
2.4.5.-LA ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO	17
2.5.-PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL SUELO	18
2.5.1.-LOS POTENCIALES ELÉCTRICOS	18
2.5.2.-LA CONDUCTIBILIDAD ELÉCTRICA	19
2.6.-APLICACIÓN DE ELECTRODOS DE ATERRAMIENTO	20
2.6.1.-ELECTRODOS VERTICALES O VARILLAS	20
2.6.2.-UTILIZACIÓN DE ELECTRODOS VERTICALES O VARILLAS	23
2.6.3.-ELECTRODOS HORIZONTALES O CONTRAPESOS	23
2.6.4.-ELECTRODO HORIZONTAL EN ZANJA	25
2.6.5.-UTILIZACIÓN DE ELECTRODOS HORIZONTALES	25
CAPÍTULO III	27
CONTROL DE DIFERENCIAS DE POTENCIAL ANORMALES	27
3.1.-LA IMPEDANCIA QUE REPRESENTA EL CUERPO	27
3.2.-PARÁMETROS ADMISIBLES EN RÉGIMEN PERMANENTE	
TIEMPO LÍMITE $1s < t \leq 3s$	27
3.3.-PARÁMETROS ADMISIBLES EN RÉGIMEN TRANSITORIO CON	
FALLA DE DURACIÓN T	29
3.3.1.-LA CORRIENTE INSTANTÁNEA ADMISIBLE	29
3.4.-TENSIÓN DE TOQUE Y TENSIÓN DE PASO	30
3.4.1.- TENSIÓN DE TOQUE	30
3.4.2.- TENSIÓN DE PASO	30
3.4.3.- TENSIÓN DE TOQUE APLICADA	30
3.4.4.- TENSIÓN DE PASO APLICADA	30
3.4.5.- MÁXIMA TENSIÓN DE TOQUE Y PASO ADMISIBLES	
EN UNA INSTALACIÓN	31
3.4.5.1.-MÁXIMA TENSIÓN DE TOQUE ADMISIBLE	31

3.4.5.2.-MÁXIMA TENSIÓN DE PASO ADMISIBLE	33
3.5.-TENSIÓN DE TRANSFERENCIA	35
CAPITULO IV	36
PUESTA A TIERRA EN BAJA TENSIÓN	36
4.1. -ESQUEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA EN BAJA TENSIÓN	36
4.2. -SISTEMA ELÉCTRICO CON NEUTRO AISLADO	36
4.3.- SISTEMA ELÉCTRICO CON NEUTRO PUESTO A TIERRA	37
4.4.-SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN EN 220 V	37
4.4.1.-SISTEMA 220 V CON NEUTRO AISLADO Y SIN PUESTA A TIERRA DEL USUARIO	37
4.4.2.-SISTEMA 220 V CON NEUTRO AISLADO Y CON PUESTA A TIERRA DEL USUARIO	38
4.4.3.-SISTEMA 220 V CON NEUTRO PUESTO A TIERRA Y SIN PUESTA A TIERRA DEL USUARIO	39
4.4.4. -SISTEMA 220 V CON NEUTRO PUESTO A TIERRA Y CON PUESTA A TIERRA DEL USUARIO	40
4.5.- SISTEMA ACTUAL DE LA CIUDAD DE LIMA	41
4.6.- EN INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN	42
4.7.- RESISTENCIAS DE DISPERSIÓN RECOMENDABLES EN INSTALACIONES INTERIORES DE B.T	43
4.8.- PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	43
4.9. – ESQUEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN BAJA TENSIÓN	44
4.9.1.- ESQUEMAS DE PUESTAS A TIERRA CLÁSICOS	44
4.9.2.- ESQUEMA DE PUESTA A TIERRA MODERNO	45
CAPITULO V	47
PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES DE POTENCIA	47
5.1.- EXPRESIÓN INICIAL PRELIMINAR	47
5.2.- DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES	48
5.2.1.- DETERMINAR MÁXIMAS TENSIONES DE TOQUE Y PASO ADMISIBLES (TOLERABLES)	49

5.2.2.- DETERMINAR LA SECCIÓN NOMINAL DEL CONDUCTOR ENTERRADO (SO)	49
5.2.3.- AJUSTE DE LA CONFIGURACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA	50
5.2.4.- TENSIONES DE TOQUE Y PASO DE LA MALLA	51
5.2.4.A. -TENSIÓN DE TOQUE DE LA MALLA	51
5.2.4.B.-TENSIÓN DE PASO DE LA MALLA	53
5.2.5.- RESISTENCIA DE LA MALLA PARA LA SUBESTACIÓN	53
5.2.6.- RESISTENCIA DE LAS VARILLAS PARA LA SUBESTACIÓN	54
5.2.7.- RESISTENCIA MUTUA MALLA – VARILLAS PARA LA SUBESTACIÓN	54
5.2.8. RESISTENCIA DE DISPERSIÓN TOTAL PARA LA SUBESTACIÓN	54
5.2.9.-POTENCIAL MÁXIMO DE DISPERSIÓN PARA LA SUBESTACIÓN	54
5.2.10.-RESULTADOS FINALES	55
5.3.- APLICACIÓN PARA UNA SUBESTACIÓN DE ALTA TENSIÓN	55
5.3.1.-RECOMENDACIONES	64
5.4.- VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA RECOMENDABLES	67
5.4.1.- EVALUACIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	67
5.4.2.- EN INSTALACIONES ENTRE 22,9 KV HASTA 220 KV	67
5.4.3.- EN INSTALACIONES DE ELECTRIFICACIÓN RURAL	67
5.5. - RESISTENCIA DE PAT EN INSTALACIONES DE A.T. EN EL LÍMITE $1KV \leq V \leq 36KV$	69
CAPITULO VI	71
PUESTAS A TIERRA EN LINEA DE TRANSMISIÓN	71
6.1.- CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE CONTRAPESO APROXIMADO	71
6.2.- CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO CONDUCTIVO	72
6.3.- FÓRMULA PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE CONTRAPESO	72
6.4.- PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PUESTAS A TIERRA CON CONTRAPESO Y CEMENTO CONDUCTIVO	73
6.4.1.- PRIMER PASO	73
6.4.2.- SEGUNDO PASO	74
6.4.3.- TERCER PASO	75

6.4.4.- CUARTO PASO	75
6.4.5.- QUINTO PASO	76
CONCLUSIONES	77
ANEXO A	78
ANEXO B	80
ANEXO C	81
ANEXO D	82
ANEXO E	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

PROLOGO

El propósito del presente trabajo de suficiencia es contar con una información de acuerdo a las Normas Internacionales, el Código Nacional de Electricidad y la experiencia de profesionales distinguidos, para ser consultados por ingenieros, estudiantes y técnicos interesados en el tema.

En el presente trabajo esperamos demostrar que los valores permisibles de las resistencias de puesta a tierra, su forma constructiva y la función específica que cumple en un sistema eléctrico no es lo mismo y a demás va a depender de la ubicación geográfica del terreno, el clima y la temperatura.

En el desarrollo del presente trabajo se utilizó el método descriptivo de acuerdo a la información de las Normas Internacionales, Código Nacional de Electricidad y la experiencia de profesionales distinguidos.

El presente trabajo consiste básicamente en conocer los valores permisibles de resistencias de puesta a tierra y su forma constructiva en baja tensión, subestaciones de potencia y líneas de transmisión.

El presente trabajo no toma en cuenta los valores permisibles de resistencias de puesta a tierra en Comunicaciones, Centro de Cómputo, Pararrayos , puestas a tierra de sistemas con neutro corrido y retorno por tierra.

El presente trabajo esta formado por seis capítulos que son los siguientes:

Capitulo I: Fundamento teórico de una puesta a tierra.

Capitulo II: Fundamentos de los electrodos de puesta a tierra

Capitulo III: Control de diferencias de potencial anormales.

Capitulo IV: Puestas a tierra en baja tensión.

Capitulo V: Puestas a tierra en subestaciones de potencia.

Capitulo VI: Puestas a tierra en líneas de transmisión.

Agradecimiento, a mis padres por ser los autores de mi existencia, a mis hermanos y en especial a Amelia y Gladys por hacer realidad el noble pensamiento de mis padres, ser un profesional, a mi alma mater la UNI y los ingenieros que con educación y sabiduría transmitieron sus conocimientos, a la UNU-Facultad de Agronomía por darme la oportunidad de trabajar en la docencia universitaria y exigirme el título que me acredite como tal, a mi asesor Ing. CARLOS HUAYLLASCO MONTALVA por su paciencia, consejos y orientación, a mis compañeros de estudios del curso de actualización de conocimientos Alex Vizcarra Mucha, Luis Félix, Rony Lauro por su apoyo y colaboración oportuna y desinteresada, a mis amigos Elina Cárdenas Pereyra, Ing. Cléber Cristóbal H., Marcos Pinedo y Níger Sánchez, por su colaboración y apoyo incondicional.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO DE UNA PUESTA A TIERRA

1.1.- El proceso de conducción de la corriente eléctrica en el suelo conductor

Un conductor es un material en el que los portadores de carga son libres de moverse bajo campos eléctricos estacionarios. Los portadores de carga son los electrones; en otros casos, la carga puede ser conducida también por iones positivos o negativos.

La carga en movimiento constituye una *corriente* y el proceso por el cual la carga se transporta se llama *conducción*. La corriente se define como la velocidad a la que se transporta la carga a través de una superficie dada en un sistema conductor.

Considerando un conductor donde existe una corriente eléctrica, los portadores de carga se mueven con una velocidad media v . La cantidad de carga dQ que recorre una distancia dl para atravesar una sección dS del conductor en un intervalo de tiempo dt es: $dQ = p dt v \cdot n dS$, p es la densidad de carga (Fig. 1.1.).

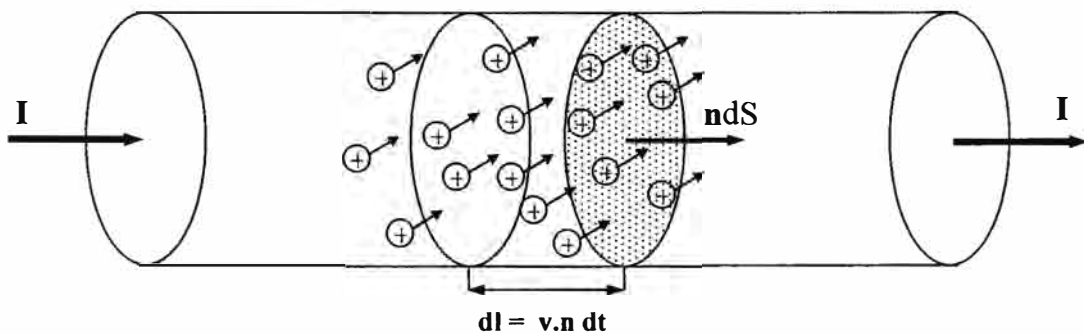


Fig. 1.1. Movimiento de los portadores de carga a través de una sección en un tiempo dt la corriente es:

$$dI = \frac{dQ}{dt} = p v \cdot n dS \quad (1.1)$$

$$I = \int p v \cdot n dS = \int_s J \cdot n dS \quad (1.2)$$

Donde $J(r) = p(r) v$, es la densidad de corriente que se da cuando la corriente atraviesa una sección del conductor.

Como la carga no se crea ni se destruye; la densidad de corriente J y la densidad de carga p están relacionadas en cada punto por la ecuación de continuidad, para una superficie cerrada.

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (1.3.)$$

Donde las variaciones en el tiempo de p son las fuentes de la corriente eléctrica. De otro lado, según la *Ley de Ohm*, la densidad de corriente J es linealmente proporcional al campo eléctrico E .

$$J = \sigma E \quad \Rightarrow \quad E = \rho J \quad (1.4.)$$

σ es la *conductividad*, que es una constante que depende únicamente del material en cuestión. La inversa de la conductividad se llama *resistividad*, $\rho = 1/\sigma$ y su unidad es $\Omega \cdot m$.

1.2.-La distribución de la corriente eléctrica para una puesta a tierra

El estudio de una puesta a tierra se fundamenta en la teoría electromagnética clásica.

Las ecuaciones de Maxwell para cualquier sistema de coordenadas se pueden enunciar en su forma diferencial como:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot D = p \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.8)$$

Si definimos la corriente I o la densidad de corriente J como variables independientes y constantes en el tiempo, los campos eléctricos E y magnético B , también son constantes en el tiempo. Definiendo el potencial escalar V ; mediante la relación:

$$E = - \nabla V \quad (1.9)$$

Y considerando que en un punto del espacio, las cargas eléctricas libres son cero, las ecuaciones 1.5 a 1.8 se pueden reducir a la conocida ecuación de Laplace para el potencial eléctrico escalar.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1.10)$$

Si el medio material es homogéneo o infinito, la solución del potencial para un punto del espacio libre de carga eléctrica y separado una distancia r de una carga puntual q , es:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1.11)$$

1.3.-El potencial de referencia cero

Si se conecta un conductor con carga Q_1 y potencial V_1 a otro conductor, con carga Q_2 y potencial V_2 , tendremos una distribución de cargas hasta que el potencial de ambos conductores sea el mismo (Fig. 1.2)

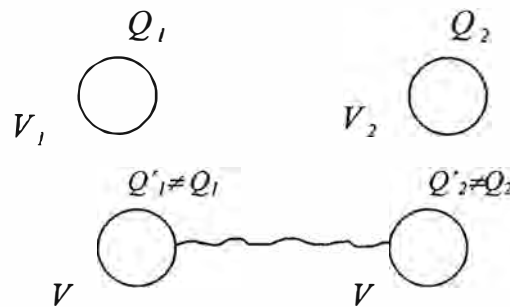


Fig. 1.2. - Potencial eléctrico entre dos conductores

Al considerar la Tierra (el planeta) como una fuente infinita de carga o como un conductor esférico de capacidad infinita ($r \rightarrow \infty$), el potencial de referencia de este gran conductor es cero.

$$V_{tierra} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} = 0 \quad (1.12)$$

Cualquier conductor conectado a Tierra, tomará o cederá de él, las cargas necesarias para que el potencial de ambos sea igual. Al considerarse nulo el potencial del conductor Tierra, cualquier conductor a Tierra su potencial es cero.

Como la carga eléctrica q , aplicada en un medio de conductividad σ (o su viceversa que es la resistividad ρ) y permitividad eléctrica ϵ_0 pueden ser reemplazada por inyección de corriente I utilizando la relación:

$$q = \frac{\epsilon_0}{\sigma} I \quad \Rightarrow \quad \frac{q}{\epsilon_0} = \rho I \quad (1.13)$$

Se obtiene de esta forma, la distribución del potencial eléctrico producido por una inyección puntual de corriente I en un medio de resistividad homogénea ρ

$$V_{(r)} = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (1.14)$$

1.4.-El potencial producido por la inyección de corriente en un electrodo

Se toma un electrodo semiesférico de radio a , que no es tan usado en la práctica, instalado en un terreno homogéneo, de resistividad ρ constante. Al hacer circular por el electrodo una corriente eléctrica I , las líneas de corriente por el terreno serán radiales, debido a la propia simetría del electrodo y la homogeneidad del terreno (Fig. 1.3a). la corriente atraviesa una serie de capas concéntricas por el electrodo, donde r es el radio de la superficie semiesférica, siendo cada una de estas superficies equipotenciales (Fig. 1.3b).

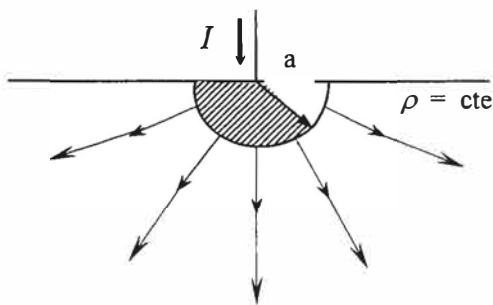


Fig. 1.3a Líneas de corriente

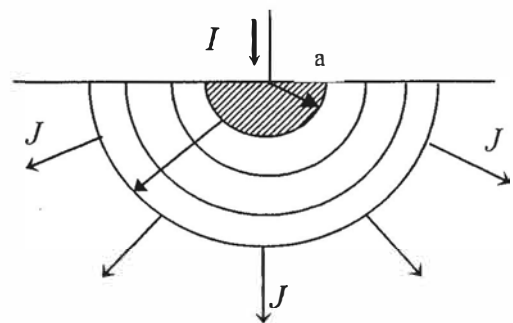


Fig. 1.3b Superficies equipotenciales

La diferencia de potencial entre dos puntos A y B del terreno, pertenecientes a superficies equipotenciales diferentes y de radios r_a y r_b (Fig. 1.4.)

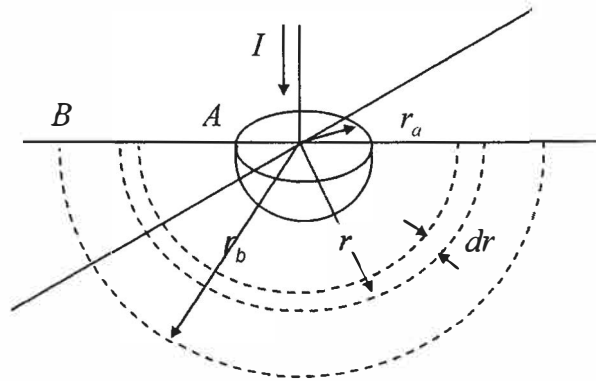


Fig. 1.4. - Potencial eléctrico de un electrodo semiesférico

Viene dado por:

$$V = V_A - V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \quad (1.15)$$

Para calcular el potencial eléctrico en un punto, es necesario hacerlo respecto a un punto de potencial nulo, el cual se considera en el infinito. De esta forma, si en la ecuación (1.15), suponemos que el punto B se encuentra en el infinito, es decir ($r_b \rightarrow \infty$) entonces ($V_B = 0$) por lo que el potencial en el punto A es:

$$V_A = \frac{\rho I}{2\pi r_a} \quad (1.16)$$

y de una forma genérica, el potencial en un punto cualquiera a una distancia r del centro del electrodo será:

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad ; \quad r > a \quad (1.17)$$

El potencial al que se encontrará sometido el propio electrodo semiesférico será constante, y teniendo en cuenta la ley de continuidad de los potenciales, se obtiene su potencial y su resistencia.:

$$V = V(a) = \frac{\rho I}{2\pi a} \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1.18)$$

1.5.-El principio de la caída de potencial

Si en el punto A se le inyecta una corriente I y se le hace circular en el suelo cerrando el lazo por el punto B a través del circuito externo (Fig. 1.5), se pueden determinar:

- El Potencial en un punto P del suelo, incluidos desde A y B
- El Potencial total en un punto cualquiera P que pertenece a una superficie equipotencial que intercepta la superficie del suelo en P_1 .

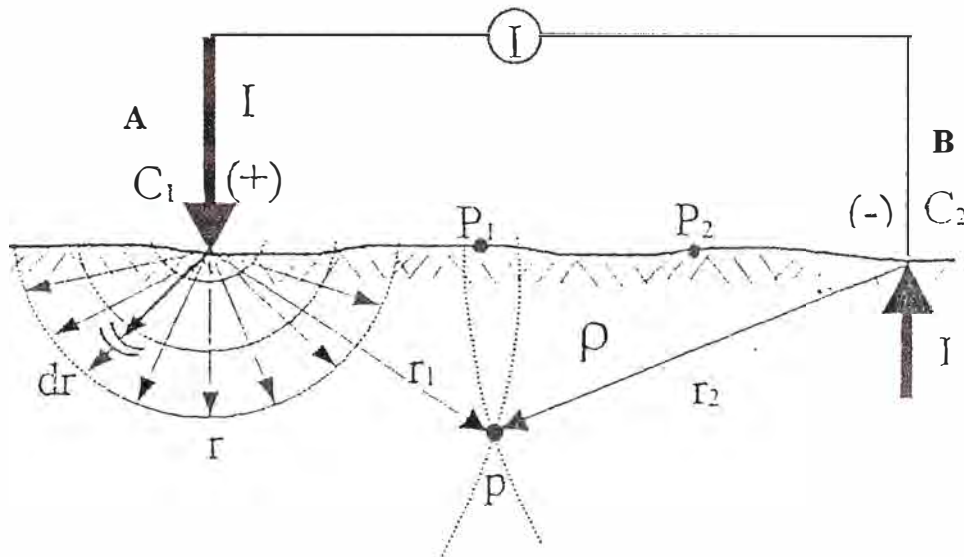


Fig. 1.5. -Potencial eléctrico en un punto P del suelo inducido por los electrodos A y B

Los potenciales en un punto P del suelo inducido desde A y B serán:

$$V_{P_A} = \frac{\rho I}{2\pi r_a} ; \quad V_{P_B} = -\frac{\rho I}{2\pi r_b} \quad (1.19)$$

El potencial total V_p en dicho punto P estará dado por:

$$V = V_{P_A} + V_{P_B} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \quad (1.20)$$

Para dos puntos cualesquiera del suelo; tales como P_1 con distancias (r_1, r_2) y P_2 con distancias (R_1, R_2) . La diferencia de potencial entre ambos será V :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.21)$$

Conociendo los parámetros del potencial V y de la corriente I o la resistencia $R = V/I$, que se mide con un telurómetro, se halla la resistividad del suelo ρ .

$$\rho = 2\pi R \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (1.22)$$

Siendo la resistencia de dispersión

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.23)$$

1.6.-El propósito de una puesta a Tierra

En una puesta a tierra la conexión entre el electrodo desnudo en contacto directo con el suelo, permiten la conducción y dispersión de las corrientes eléctricas (Fig. 1.6), para brindar seguridad eléctrica y asegurar funcionamiento de los aparatos conectados al circuito eléctrico. Se tiene las siguientes finalidades importantes:

- Evacuan y dispersan las corrientes eléctricas con mínima resistencia, evitando sobretensiones internas y externas.
- Permitir que la protección del circuito eléctrico despeje la falla inmediatamente ocurrida esta.
- Proveen a las masas eléctricas el potencial de referencia cero, debido a que la Tierra se comporta como un conductor infinito de carga, que hace que su potencial eléctrico sea cero ($V = 0$).

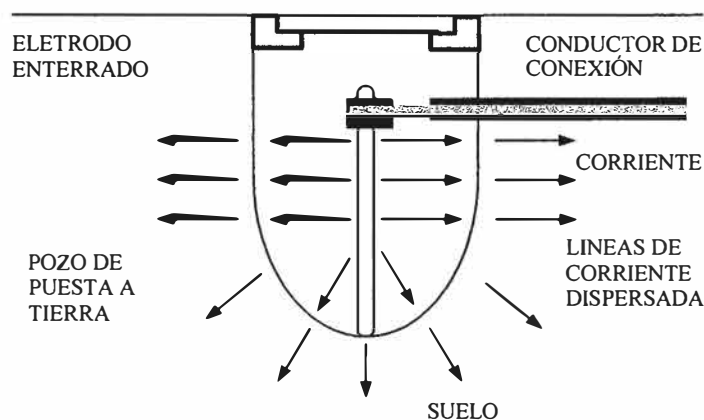


Fig. 1.6.-Dispersión de corrientes en el suelo

II. CAPITULO FUNDAMENTOS DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA TIERRA

2.1- Elementos que conforman un sistema de puesta a tierra.

2.1.1.-Conductores

Los conductores que se utilizan en los sistemas de puesta a tierra son generalmente de cable de cobre cuyo calibre depende del sistema para el cual se utilice (sistema radial, sistema de anillo o sistema enmallado).

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

2.1.2.-Electrodos

Son las varillas, conductores cableados, pletinas, placas o combinación de ellos. Los electrodos verticales son las varillas que se entierran en suelos más o menos blandos y que sirven para encontrar zonas más húmedas, y por lo tanto con menor resistividad. Son especialmente importante en terrenos desprotegidos de vegetación y cuya superficie, al quedar expuesta a los rayos del sol, esta completamente seca.

Los electrodos pueden fabricarse con varillas de Copperweld, con varillas sólidas de cobre o tubos, o bien, con varillas de fierro galvanizado.

En el caso del fierro galvanizado, se puede usar en terrenos cuya constitución química no ataque a dicho material.

En terrenos cuyas componentes son más corrosivas, se utiliza el Copperweld que combina las ventajas de la alta conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del fierro. Tienen buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica para ser enterrada en el suelo y se puede conectar a los cables del sistema de puesta a tierra a través de los conectores respectivos.

2.1.3.-Conectores y accesorios

Se denomina conectores y accesorios a los elementos que nos sirven para unir a la puesta a tierra los electrodos profundos, las estructuras, los neutros, entre otros.

Entre los principales conectores utilizados en los sistemas de puesta a tierra se tiene: los conectores atornillados, conectores a presión y conectores soldados.

Todos los tipos de conectores deben poder soportar la corriente de la puesta a tierra en forma continua.

Los conectores atornillados se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material esta formado por bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión.

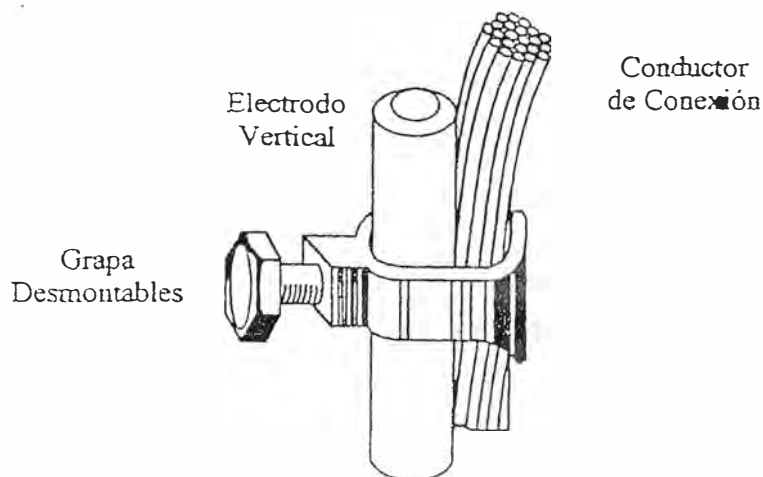


Fig. 2.1.-Conector

La utilización del bronce, que es un material no magnético, proporciona una conducción segura para las descargas atmosféricas que son de alta frecuencia.

Los conductores a presión son más económicos que los atornillados y dan mayor garantía de buen contacto.

Los conectores soldados son los más económicos y seguros por lo que se usan con mucha frecuencia. En la siguiente figura se muestra algunos conectores.

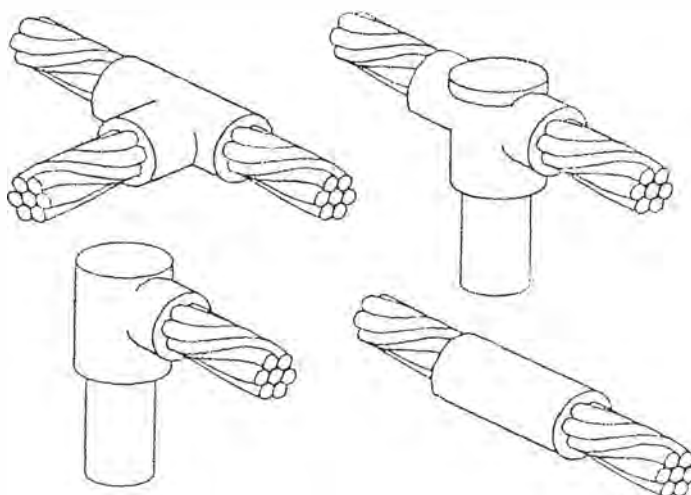


Fig. 2.2 .- Conectores termo soldados.

2.1.4.- Capacidad de transporte de corriente de falla

El tipo de unión puede influir en el tamaño del conductor usado debido a las diferentes temperaturas máximas permisibles para las distintas uniones. La tabla siguiente indica la máxima temperatura permisible para diferentes tipos de uniones y el tamaño del conductor requerido según el tipo de unión, para una corriente de falla de 25 kA y una duración de 1 segundo.

TABLA 2.1.-Temperatura máxima permisible para diferentes tipos de unión

Tipo de unión	Apernada	Bronceada	Soldada
Temp. Máxima	250° C	450° C	700° C
Calibre conductor	152 mm ²	117 mm ²	101 mm ²

2.2.-Tipos de puesta a tierra

Las puestas a tierra son requeridas de acuerdo a su utilidad. Las destinadas a dispersar la corriente alterna conducen la corriente eléctrica en intervalos de tiempo muy cortos, debido a que involucra gran disipación de energía por las elevadas magnitudes de corriente transitoria y pequeñas magnitudes de corriente permanente.

2.2.1.-Aterramientos de seguridad

Son aquellos aterramientos que controlan los gradientes peligrosos (tensiones de toque y paso), y deben tener bajas resistencias de dispersión.

2.2.2.-Aterramientos formales

Son aquellos aterramientos que pueden tener moderadas o bajas resistencias de dispersión y están compuestos básicamente por electrodos verticales y horizontales o mixtos, siendo que rara vez su máxima profundidad excede los 4 m porque utilizan los estratos superficiales del suelo para dispersar la corriente de falla. No tienen como objetivo el control de los gradientes peligrosos y generalmente se utilizan en baja tensión. /5/

2.3.-Comportamiento eléctrico del suelo

Uno de los factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un sistema de puesta tierra es la condición del terreno a través del cual va a circular la corriente, ello involucra entonces no solamente al volumen del terreno sobre el cual esté emplazada la instalación de tierra, sino también el de sus alrededores.

2.4.-Resistividad

El cálculo de la resistencia a la propagación de todo electrodo (sencillo o múltiple) se realiza con base en cierto valor de conductividad o de su inversa la resistividad del terreno, la cual es variable dentro de un amplio rango, según sus condiciones geológicas o geofísicas; por conveniencia el análisis fundamental se desarrolla suponiendo un terreno homogéneo, es decir que posee la misma naturaleza geológica y geofísica en el volumen de tierra ilimitado por todos lados en el que está embutido el sistema de tierra y por el cual las líneas de corrientes se propagan; sin embargo, en la realidad y en la mayoría de los casos el terreno es de naturaleza heterogénea.

2.4.1.-Resistividades referenciales de los suelos

La variación de la resistividad según la composición del suelo es muy amplia, además existe la dificultad que las diferentes clases de suelos no están delimitadas como para saber con anticipación el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la puesta a tierra.

Inclusive se da el caso que para una misma clase de terreno, ubicada en diferentes posiciones, la resistividad del suelo puede ser sensiblemente diferente.

A continuación se muestra la tabla que proporciona valores referenciales para la resistividad aparente de los suelos.

TABLA 2.2.- Resistividades referenciales de los suelos /2//5/

Tipo de suelo	Resistividad Aparente $\rho(\Omega - m)$
Terrenos vegetales	10 – 50
Arcillas, limos	20 – 80
Tierras de cultivo	50 – 100
Arenas arcillosas	80 – 200
Fangos turbos	150 – 300
Tierra aluvional	200 – 500
Arenas y eriales	250 – 800
Pedregales y dunas	300 – 3 000
Roca compactas	2 500 – 10 000
Feldespatos secos	3 000 – 30 000
Concreto de cimentación	10 000 – 50 000

Entre los factores que influyen apreciablemente sobre el valor de la resistividad del suelo tenemos:

- El contenido de agua o grado de humedad del terreno.
- La temperatura.
- El grado de compactación del suelo.
- La estratificación del suelo.
- La granulometría

2.4.2-Grado de humedad del terreno

La resistividad que presenta un terreno depende de su estado hidrométrico, al aumentar la humedad disminuye la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad. En todo caso siempre que se añade agua a un terreno disminuye su

resistividad respecto a la resistividad que tendría estando seco. En la siguiente figura se puede observar la variación de resistividad en función al porcentaje de humedad, en una muestra de arcilla.

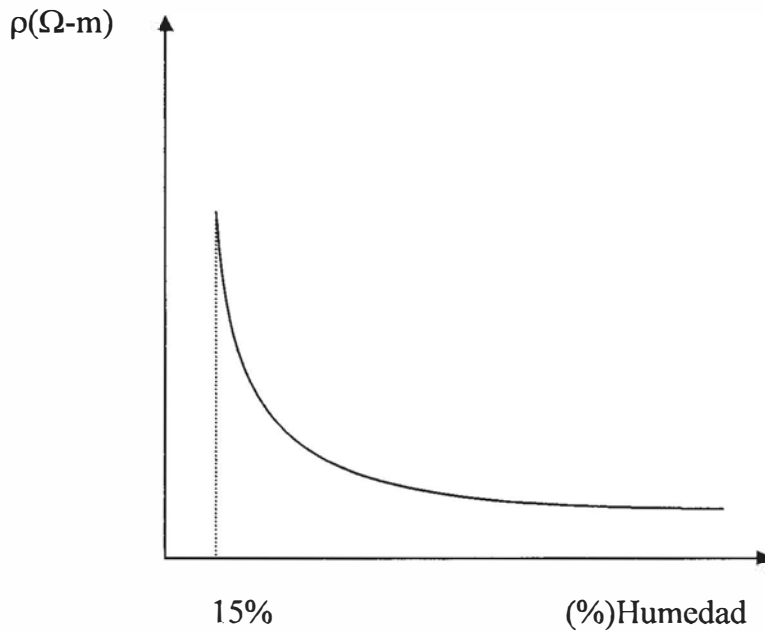


Fig. 2.3.- Variación de resistividad en función al porcentaje de humedad

2.4.3.-La temperatura

La temperatura del terreno depende de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de 0°C el agua que contiene se congela. El hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico, lo que implica que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve interrumpida al congelarse esta.

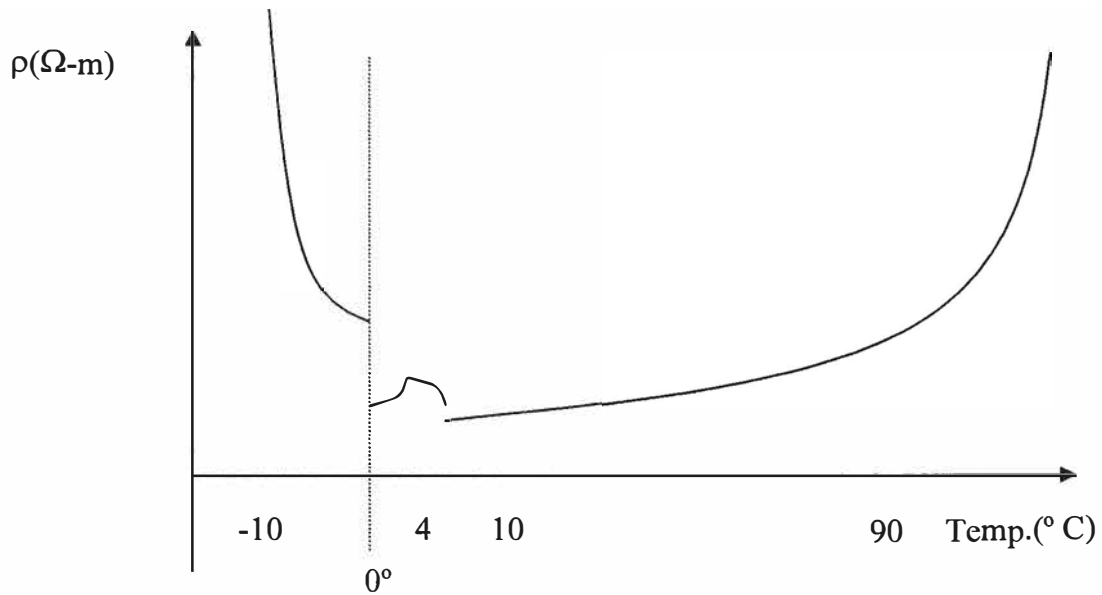


Fig. 2.4. -Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura

2.4.4.-El grado de compactación del suelo

Cuando la compactación del terreno es grande disminuye la resistividad, por lo tanto es recomendable una compactación adecuada.

En la siguiente figura se muestra cualitativamente la influencia de la compactación del suelo, en la variación de la resistividad.

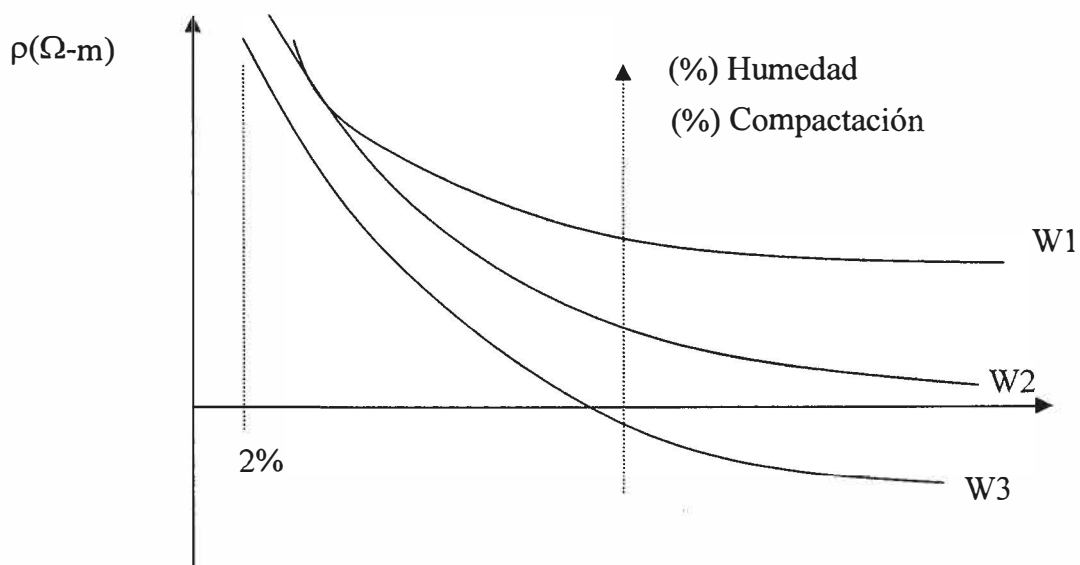


Fig. 2.5.- Variación de la resistividad en función del grado de compactación del suelo.

2.4.5.-La estratificación del suelo

El suelo esta formado por estratos (capas) que tienen diferentes resistividades y profundidades debido a la formación geológica que son generalmente horizontales y paralelas a la superficie.

Existen estratos que se presentan en forma inclinada o verticales debido a fallas geológicas pero para los estudios se asumen horizontales.

En la siguiente figura se observa que el comportamiento de la resistividad del terreno no es uniforme y depende de la característica de los estratos.

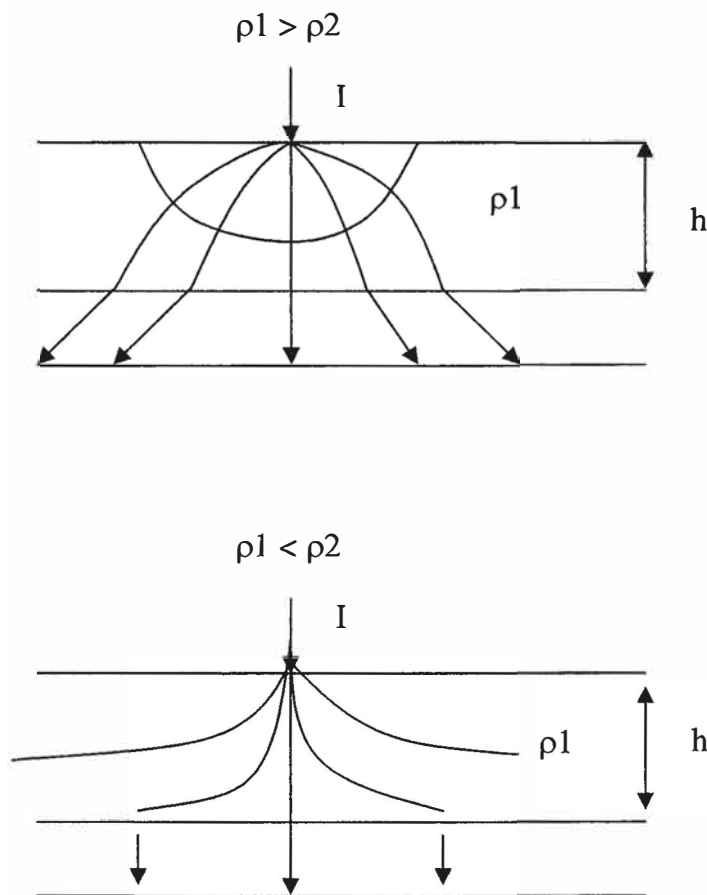


Fig. 2.6.- Influencia de la estratificación del suelo.

La resistividad del suelo, en ausencia de efectos secundarios, se considera prácticamente independiente de la corriente eléctrica que lo recorre. Sin embargo, existen otros factores que son susceptibles de modificar la resistividad del suelo pero debido a su naturaleza eléctrica, solo pueden surgir posteriormente a la instalación del sistema de puesta a tierra. Entre ellas tenemos:

- El efecto de gradiente de potencial elevado.
- El calentamiento del suelo a consecuencia de la circulación de corrientes de puesta a tierra elevadas o de forma prolongada.

2.5.-Propiedades eléctricas del suelo

Las propiedades generales magnéticas y eléctricas son: susceptibilidad magnética y eléctrica, permeabilidad magnética, polarización magnética y eléctrica, potenciales eléctricos, constante dieléctrica, conductibilidad eléctrica (o su resistividad); sin embargo los esenciales para la técnica de puesta tierra son: los potenciales eléctricos, la conductibilidad eléctrica, la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética.

2.5.1.-Los potenciales eléctricos

En los sistemas de puesta a tierra artificiales, los potenciales determinantes son originados por las corrientes introducidas al suelo, ya sea de manera deseada o indeseada; pero no se debe ignorar o menospreciar a los potenciales eléctricos naturales dentro de la masa rocosa. Ciertos potenciales naturales o espontáneos que ocurren en la costra de la tierra, en las cercanías de la superficie son originados por actividad electroquímica y mecánica; sin embargo en todos los casos el factor integrante es el agua subterránea. Tales potenciales está asociados con la descomposición de cuerpos minerales sulfurosos, variaciones en las propiedades de las rocas (contenido mineral), en contactos geológicos, actividad bioeléctrica de materiales orgánicos, corrosión gradiente térmico y de presión en fluidos subterráneos, así como con otros fenómenos de naturaleza similar, pero existen cuatro mecanismos principales que producen tales potenciales: el primero es de naturaleza mecánica y los otros tres, de origen químico.

En la siguiente figura se muestra una fuente (I) que inyecta en C1 corriente al suelo, y el circuito exterior se cierra físicamente en C2.

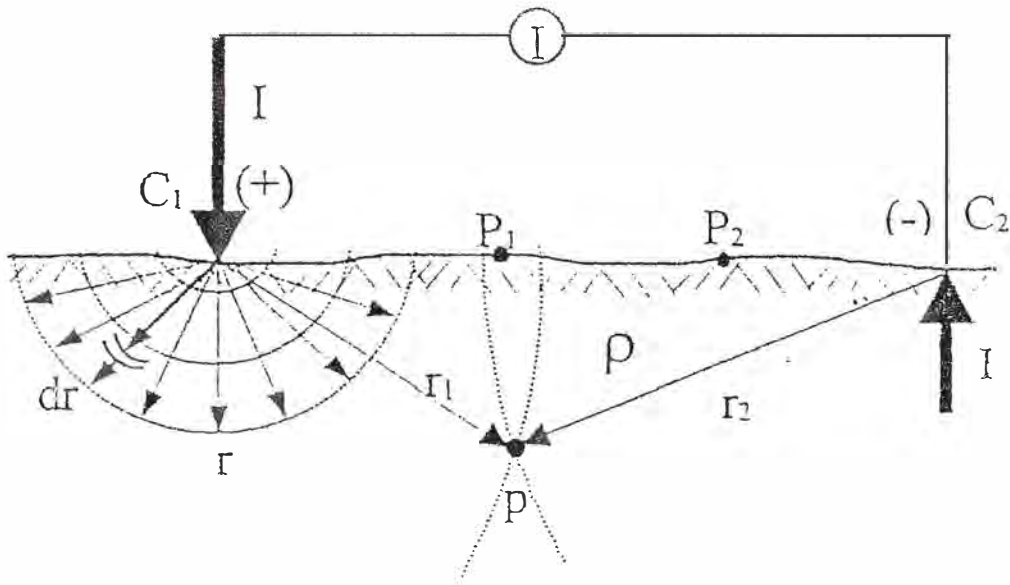


Fig. 2.7. - Principio de la caída de potencial

Los potenciales en (p) respecto de (C1) y (C2) serán

$$V_{p1} = \frac{\rho I}{2\pi r1} \quad V_{p2} = -\frac{\rho I}{2\pi r2} \quad (2.1)$$

El potencial para dos puntos cualesquiera (P1), con distancias (r1, r2) y P2 distancias R1 y R2, la diferencia de potencial entre ambos será Vs:

$$V_s = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r1} - \frac{1}{r2} - \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) \quad (2.2)$$

Conociendo I y Vs o bien $R = V_s / I$ se halla ρ

2.5.2.-La conductibilidad eléctrica

Es la propiedad de los cuerpos de transportar electricidad y se expresa generalmente por el valor de su inversa, que es la resistencia eléctrica específica ρ .

La corriente eléctrica puede ser propagada en las rocas y minerales por medio de tres mecanismos: electrónico, electrolítico y conducción dieléctrica.

2.6.-Aplicación de electrodos de aterramiento

Cuando la corriente de tierra no es muy intensa y el equipo o elementos por conectar a tierra no están muy separados entre sí, ni de un electrodo, la puesta a tierra puede hacerse por medio de ese único electrodo, con la forma geométrica más conveniente es decir la que ofrezca mejor eficiencia y requiera un menor gasto; sin embargo cuando, por el contrario, la corriente a tierra sea muy elevada y todos los medios de servicio y elementos por conectar a tierra están muy dispersos sobre una superficie más o menos extensa, se necesita utilizar varios electrodos.

2.6.1.-Electrodos verticales o varillas

Esta clase de electrodo, uno de los más usados en la ingeniería de puesta a tierra, se forma por medio de la introducción vertical en el terreno de un elemento metálico conductor tipo tubo, varilla sólida o perfil, muy delgado en comparación de su longitud, la cual puede llegar a ser 4 m.

Un método válido para determinar las expresiones matemáticas de electrodos es considerarlos como una extensión natural de una fuente puntual o lineal. En el caso particular del electrodo tipo varilla sólida, tubo o perfil, se puede partir de una fuente lineal, a la cual se aplica el principio de la imagen reflejada, se indaga la distribución de su potencial y luego se trata de identificar la imagen de sus líneas equipotenciales con las de algún electrodo conocido. Se persigue así mismo que las expresiones finales de sus magnitudes características queden en función de parámetros que sean fáciles de determinar en la práctica y que no resulten sofisticados y hasta difíciles de evaluar.

Cuando se le introduce al desarrollo gemelo la corriente J , brota del elipsoide de rotación la corriente impresa $J = 2 I$. Para orientar su campo se aplica en este caso un sistema de coordenadas cartesianas haciendo coincidir la longitud 2ℓ con el eje y .

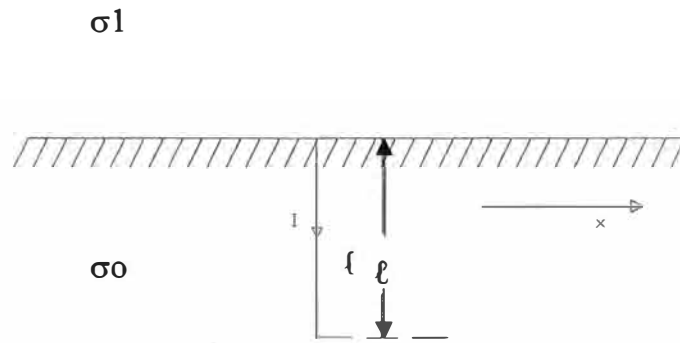


Fig. 2.8. - Fuente lineal embutida en un terreno

Considerando la fuente lineal mostrada en la figura 2.8 embutida en un terreno con resistividad ρ , pero contra la atmósfera, a la cual al aplicarle el principio de la imagen reflejada origina un electrodo gemelo lineal con una longitud doble según se muestra en la figura 2.9.

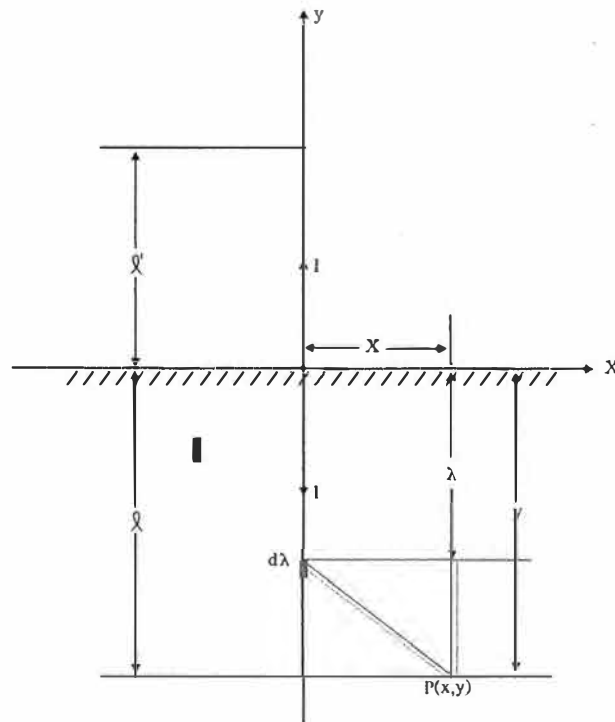


Fig. 2.9. - Fuente lineal a la cual se le aplica el principio de la imagen reflejada

Rodeado por todos lados, ahora por un medio homogéneo, el cual emite una corriente en principio uniforme distribuida a lo largo de la longitud 2ℓ (en rigor no es así, pero la pequeña diferencia que existe es insignificante para la práctica general).

Conviene indagar el potencial en un punto P arbitrario en el espacio, con coordenadas (x,y) , el cual estará determinado por la contribución de potencial de todas y cada una de las partes parciales que forman a la fuente lineal.

Así la contribución parcial al punto en cuestión del pedazo parcial de fuente, será :

$$d\phi = (2J d\lambda/2 \ell) (\rho/4\pi) (1/\sqrt{(x^2 + (y-\lambda)^2)}) \quad (2.3)$$

Llegándose finalmente a la siguiente expresión para el potencial del electrodo tipo varilla sólida, tubo o perfil:

$$\phi = 2J \rho/4\pi \ell \ln (4\ell/d) \quad (2.4)$$

Por lo tanto, la resistencia a la propagación del electrodo gemelo tipo varilla sólida, tubo o perfil rodeado por todos lados de un terreno homogéneo con resistividad ρ , se expresa como:

$$R_o = \phi /2J = \rho/4\pi \ell \ln (4\ell/d) \quad (2.5)$$

Y cuando se hace un corte por el eje de la simetría (a nivel del suelo) , no cambia nada en lo referente a la distribución del potencial, ya que ambas partes son iguales tanto arriba como abajo del plano de simetría ; entonces al quitarse el semiespacio superior, el restante representa a la tierra en la cual está embutido el electrodo en toda su longitud; tal electrodo emite solo la mitad de la corriente del electrodo gemelo la cual para toda la longitud 2ℓ y el espacio completo, se le había asignado el valor $2J$. En tales condiciones la resistencia a la propagación del electrodo tipo varilla sólida, tubo o perfil, embutido en el terreno en toda su longitud ℓ pero contra la atmósfera, debe tener un valor doble, resultando:

$$R_o = \rho/2\pi \ell \ln (4\ell/d) \quad (2.6)$$

2.6.2.-Utilización de electrodos verticales o varillas

En el mercado nacional existe varillas de cobre de naturaleza dura, ya cortadas en longitudes normalizadas de 2,0m, 2,5m, 3,0m y 3,5m, con diámetros a escoger de 0,013m, 0,016m o 0,019m; se elige el tamaño más comercial que tiene 2,5m de longitud, la medida real se da en pies ($8' = 2,4384\text{m}$), y un diámetro de 0,016m o 0,019m. El valor alcanzado por la resistencia de dispersión de la puesta a tierra se puede optimizar con la utilización del relleno en el pozo.

En la siguiente figura se muestra el efecto de la variación de la longitud del electrodo vertical (considerando resistividad del suelo uniforme) sobre el valor final de la resistencia de dispersión de la puesta a tierra.

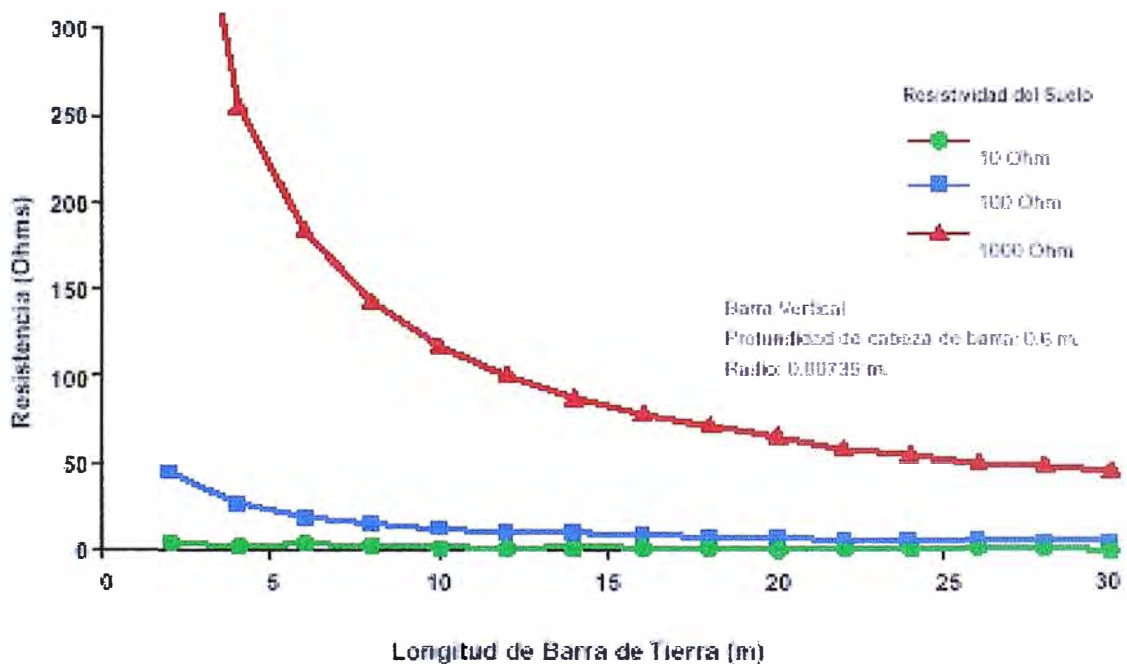


Fig. 2.10. - Efecto del incremento de longitud de un electrodo vertical

2.6.3.-Electrodos horizontales o contrapesos

El análisis del electrodo de placa elíptica es de interés, no sólo por la similitud física que se puede encontrara con electrodos de uso común en la práctica sino también en virtud de que se deriva el correspondiente al electrodo rectilíneo de banda, ya sea en forma de

listón o conductor cilíndrico, el cual forma parte prácticamente de todos los sistemas de puesta a tierra.

Se trata pues de un electrodo superficial en forma elíptica, según se muestra en la figura 11, es decir, embutido en el terreno y con una de sus caras expuesta contra la atmósfera, con semieje mayor A y semieje menor B, a la cual se le introduce desde el exterior la corriente I.

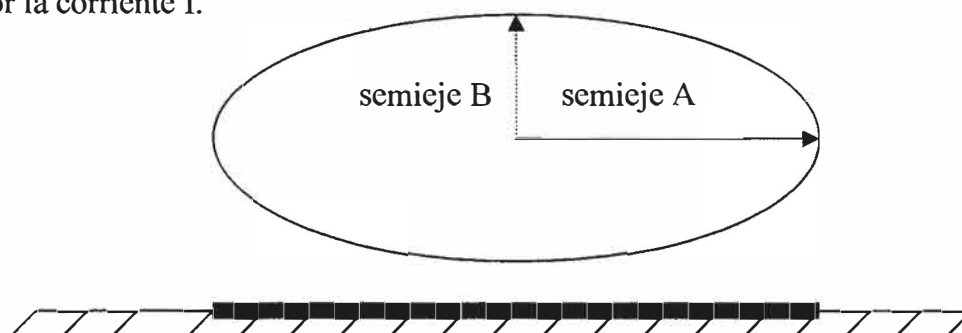


Fig. 2.11. - Electrodo superficial en forma elíptica

Al reflejar a tal electrodo, resulta un electrodo gemelo, del cual brota la corriente $J = 2I$ hacia todas las direcciones del ahora ilimitado y homogéneo medio de conductividad σ . En este caso la orientación del campo de corriente del electrodo gemelo se hace, primeramente considerando que en el centro de contacto de la elipse se origina el sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) .

Con base a una serie de consideraciones en relación con la elipse límite que decae sobre el plano $z = 0$ siguiente:

$$x^2/c + y^2/(c-b) = 1 \quad (2.7)$$

siendo b y c parámetros en la elipse límite

Se puede establecer las siguientes relaciones : $A = \sqrt{c}$, $B = \sqrt{c-b}$;

Si se introduce las coordenadas generales elípticas ortogonales (u, v, w) , en las cuales, (según se muestra en el desarrollo del problema de la transformación de Laplace), el potencial ϕ está sometido a la siguiente ecuación diferencial ordinaria :

$$\frac{d}{dw} \left(\sqrt{p(w)} \frac{d\phi}{dw} \right) = 0 \quad (2.8)$$

La expresión para la resistencia a la propagación del electrodo de placa elíptica queda como la ecuación siguiente:

$$R_o = \frac{\rho}{l} = \frac{K}{2 \pi \sigma A} \quad (2.9)$$

Donde $k = \sqrt{1 - (B/A)^2}$

Del concepto de electrodo de placa elíptica se deriva fácilmente el electrodo rectilíneo de banda, según se muestra en la siguiente figura 12, el cual prácticamente interviene en todos los sistemas de puesta a tierra, ya sea en forma de listón o de conductor cilíndrico.

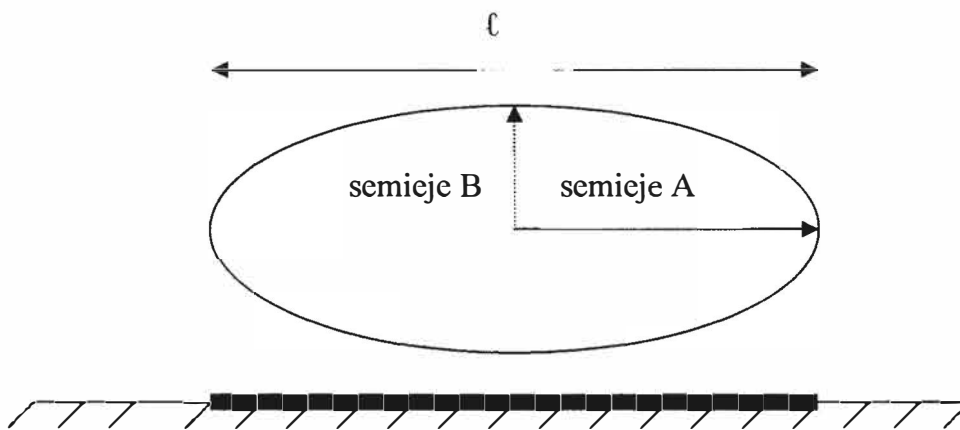


Fig. 2.12.- Electrodo rectilíneo de banda derivado

La suposición de que $B \ll A$ conduce a la representación a manera de modelo de un electrodo formado por un largo tramo de banda de longitud ℓ y ancho d ; entonces

$$k' = B/A \quad \text{se aproxima } K \approx \ln \frac{4}{k'}$$

En la cual se debe sustituir $A = \frac{1}{2} \ell$ y $B = \frac{2d}{\pi}$

y en consideración de la ecuación de R_o , se llega a la expresión final para la resistencia a la propagación del electrodo de banda:

$$R_o = \frac{\rho}{\pi \ell} \ln\left(\frac{\pi \ell}{d}\right) \quad (2.10)$$

2.6.4.-Electrodo horizontal en zanja

El electrodo horizontal en zanja se aplica poco y se emplea en su instalación un electrodo simple de cobre tipo platina o un conductor desnudo ubicado a una profundidad h por debajo del nivel del suelo, como se muestra en la siguiente figura; su resistencia se expresa como:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \text{Ln}\left(\frac{4L^2}{hd}\right) \quad (2.11)$$

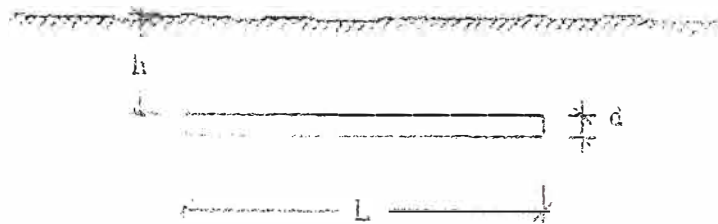


Fig. 2.13. - Electrodo horizontal en zanja

2.6.5.-Utilización de electrodos horizontales

En el mercado nacional existen las pletinas de cobre a partir de 3m de longitud con variadas secciones. En caso de escasez se podrá utilizar un conductor de cobre desnudo de 100mm^2 de naturaleza semidura o blanda.

En algunos casos debido a las características del terreno, se utilizan puestas a tierra con electrodos horizontales, siendo el electrodo de acero galvanizado. Por ejemplo, para una línea de transmisión en 60 kV con estructuras tipo celosía, ubicada en la selva del PERÚ, se utilizan electrodos de cable de acero galvanizado de 95mm^2 / 7hilos con un recubrimiento por hilo de 70 micras de zinc.

El valor alcanzado por la resistencia de dispersión de la puesta a tierra se puede optimizar con la utilización del relleno en una zanja.

En la siguiente figura se muestra el efecto de la variación de la longitud del electrodo vertical (considerando resistividad del suelo uniforme) sobre el valor final de la resistencia de dispersión de la puesta a tierra.

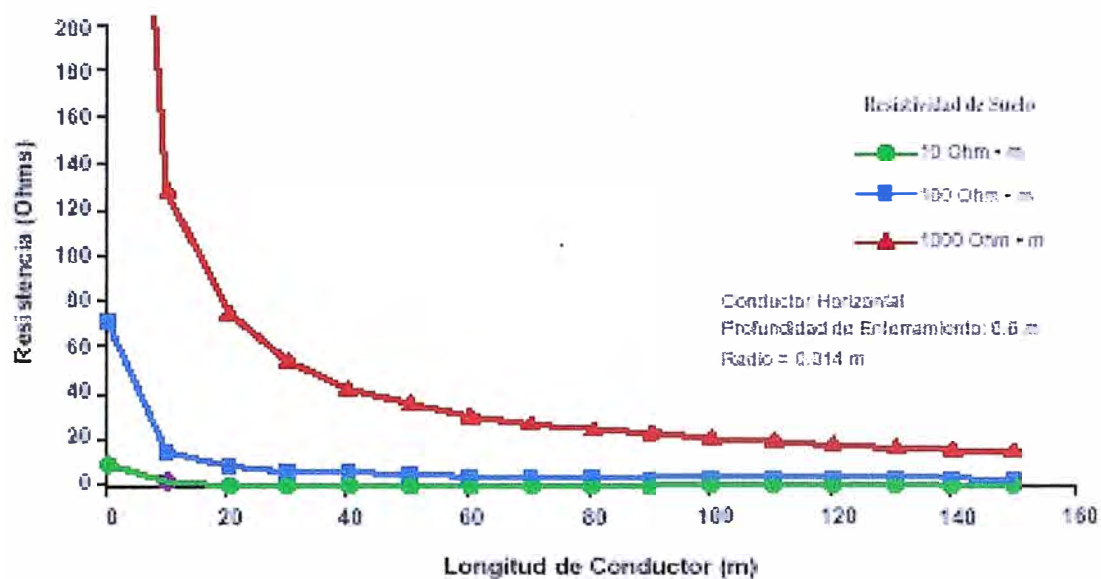


Fig. 2.14. - Efecto del incremento de longitud de un electrodo horizontal

CAPITULO III

CONTROL DE DIFERENCIAS DE POTENCIAL ANORMALES

3.1.-La impedancia que representa el cuerpo.

La magnitud de la impedancia que representa al cuerpo humano se desarrolla inversamente a la tensión aplicada entre los puntos de contacto del cuerpo de la persona, incrementando la peligrosidad con la disminución de su valor. La resistencia entre partes del cuerpo varía entre 500Ω a 1500Ω .

En las normas se establece como resistencia promedio 1000Ω .

3.2.-Parámetros admisibles en régimen permanente tiempo límite $1s < t \leq 3s$.

En las normas, se reconocen como valor admisible para la corriente a frecuencia industrial, el límite máximo de 50 mA soportado sin daño a la salud por personas de más de 50 kg de peso. Se considera que la resistencia corporal al paso de la corriente se mantiene inalterable en su valor promedio; según ello se tiene:

- Corriente Admisible : $I_k = 0.050 \text{ A}$
- Resistencia Promedio : $R_k = 1000 \Omega$
- Tensión Admisible : $V_k = 50 \text{ V (Seco)}$
 $V_k = 24 \text{ V (Mojado)}$

Referencia /6/, /12/

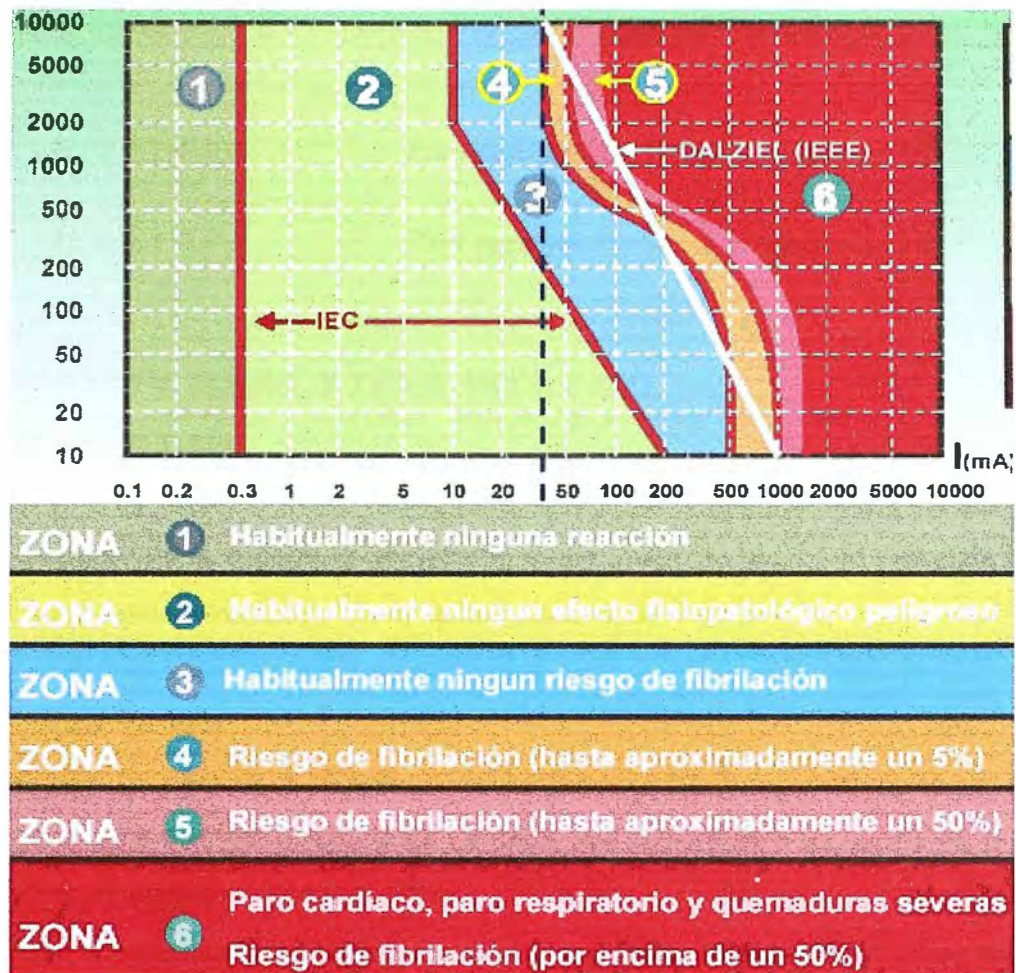


Fig. 3.1.- Recomendaciones IEC 60479 e IEEE

3.3.-Parámetros admisibles en régimen transitorio con falla de duración t .

Las Corrientes admisibles durante muy breves intervalos controlados, decenas de milisegundos (caso de fallas a tierra), pueden ser mucho mayores que las definidas como estacionarias o temporales, dado que en muy pequeños lapsos de tiempo los efectos físico-químicos o electrolíticos de la corriente eléctrica no llegan a desarrollarse.

3.3.1.-La Corriente Instantánea Admisible.

Con experimentos complementarios de laboratorio para la aplicación inofensiva de corrientes entre partes del cuerpo humano, ha sido demostrada por Charles Dalziel, una relación termodinámica entre la energía absorbida y la intensidad de la corriente admisible I_k en un tiempo finito t (constante de energía de aguante del cuerpo humano), asociado a la

interrupción automática del suministro eléctrico (fusible o interruptor), en la siguiente forma:

$$I_K = 0.116/\sqrt{t} \quad \text{Para personas de 50 kg y valores de } t > 0,03 \text{ s} \quad (3.1)$$

$$I_K = 0.157/\sqrt{t} \quad \text{Para personas de 70 kg y valores de } t > 0,03 \text{ s} \quad (3.2)$$

3.4.-TENSIÓN DE TOQUE Y TENSIÓN DE PASO

3.4.1.-Tensión de toque

La tensión de toque es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia horizontal máxima que se puede alcanzar, o sea, aproximadamente 1 m. /8/

3.4.2.-Tensión de paso

La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo. /8/

El gradiente de potencial en una región coincide, prácticamente, con el valor más elevado que puede alcanzar la denominada tensión de paso que adquiere sus valores más elevados en las proximidades inmediatas de los electrodos de puesta a tierra.

3.4.3.-Tensión de toque aplicada

Es la parte de la tensión de toque que resulta directamente aplicada entre dos puntos del cuerpo humano, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito y estimándose la del cuerpo humano en 1000Ω . ($R_{\text{mano}} = R_o = 0\Omega$)

3.4.4.-Tensión de paso aplicada

Es la parte de la tensión de paso que resulta directamente aplicada entre los pies de un ser humano, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito y estimándose la del cuerpo humano en 1000Ω .

3.4.5.-Máxima tensión de toque y paso admisibles en una instalación

3.4.5.1.-Máxima tensión de toque admisible

El circuito equivalente para la tensión de toque aplicada (contacto establecido entre mano y pie, descansando sobre los puntos A, de la masa metálica, y B, del terreno, respectivamente), se representa en la siguiente figura:

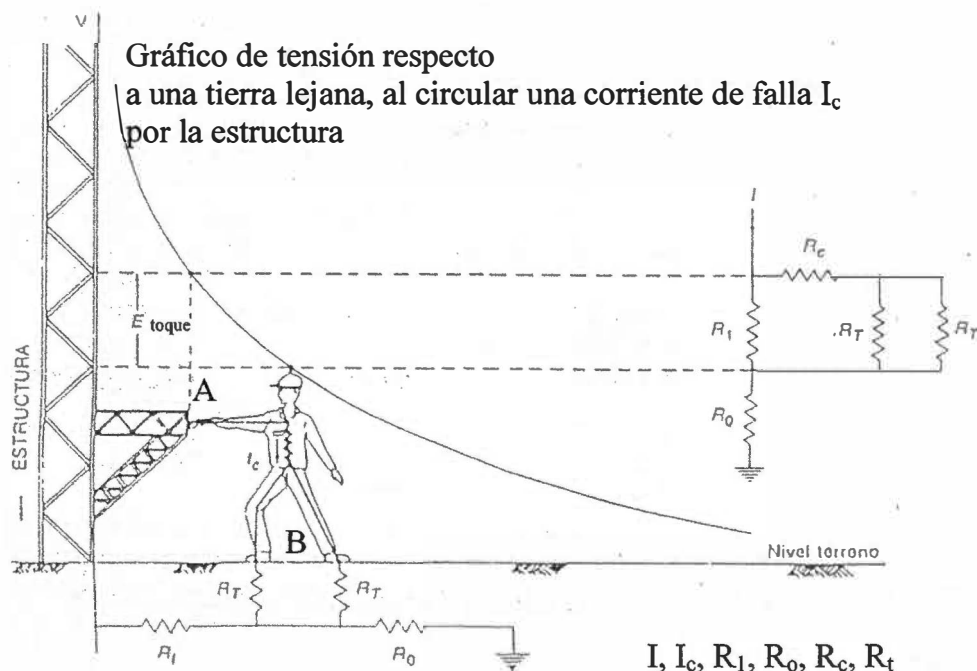


Fig. 3.2. -Circuito equivalente para determinar la tensión de toque aplicada.

Donde:

- ρ_s : Resistividad del terreno superficial
- R_t : Resistencia del terreno bajo los pies
- R_c : Resistencia equivalente del cuerpo humano
- V_t : Tensión de toque en la instalación
- V_{ta} : Tensión de toque aplicada al individuo
- I_c : Corriente que circula a través del cuerpo humano

Se desprecia la resistencia del calzado y se omite la resistencia de la mano, que sería función principalmente de la superficie y de la presión de contacto.

La magnitud de la corriente derivada por el individuo (del orden de los mA), no alterará de forma sensible el valor de la corriente de puesta a tierra, de forma que se puede despreciar cualquier modificación de la tensión preexistente V_t , y considerarla como una

fuentes de tensión ideal; esta forma de proceder proporciona valores más conservadores que la expresión rigurosa y se obtiene un circuito simplificado.

Por tanto, la tensión de toque aplicada se expresa como:

$$V_{ta} = \frac{V_t}{(R_c + R_t/2)} \cdot R_c \quad (3.3)$$

Si se toma en cuenta que la resistencia media del cuerpo humano es $R_c = 1000 \Omega$ y $R_t = 3\rho_s$, se obtiene:

$$V_{ta} = \frac{1000}{(1000 + 1,5\rho_s)} \cdot V_t \quad (3.4)$$

De donde, si se desea deducir el máximo valor admisible de la tensión de toque en la instalación V_t , se debe despejar ese término de la expresión anterior y adoptar el máximo valor admisible para la tensión de toque aplicada. $V_{ta \max}$.

$$V_t = \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1000}\right) \cdot V_{ta \max} \quad (3.5)$$

Pero:

$$V_{ta \max} = (I_{c \max}) (R_c)$$

Donde:

$$I_{c \max} = I_K = 0.116/\sqrt{t} \text{ para personas de 50 kg en promedio.}$$

Se obtiene finalmente:

$$V_t = (0,116/\sqrt{t}) \cdot (1000 + 1,5\rho_s) \quad (3.6)$$

se considera la resistividad de la grava (piedra picada $\rho_s = 3000$ a $8000 \Omega\cdot m$), que se acuerda debe cubrir el suelo de las subestaciones.

En el IEEE Std. N° 80 se propone una corrección a esta expresión presentada, en función al factor de la capa superficial del terreno (C_s), la cual se muestra a continuación:

$$V_t = (1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (3.7)$$

Donde:

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

- ρ : Resistividad del suelo
 ρ_s : Resistividad de la capa superficial (grava)
 h_s : Espesor del piso de grava
 C_s : Factor de la capa superficial

3.4.5.2.-Máxima tensión de paso admisible

El circuito equivalente para la tensión de paso aplicada (contacto establecido entre pie y pie) sobre los puntos A y B, del terreno, se representa en la siguiente figura:

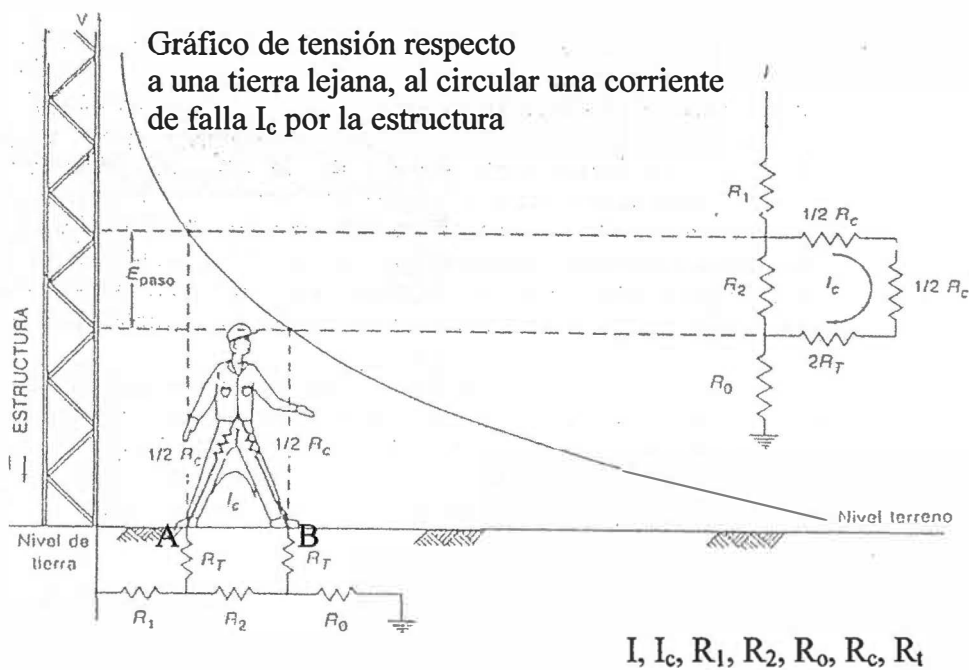


Fig. 3.3. - Circuito equivalente para determinar la tensión de paso aplicada.

Donde:

- ρ_s : Resistividad del terreno superficial
 R_t : Resistencia del terreno bajo los pies
 R_c : Resistencia equivalente del cuerpo humano
 V_p : Tensión de paso en la instalación
 V_{pa} : Tensión de paso aplicada al individuo
 I_c : Corriente que circula a través del cuerpo humano

Se desprecia la resistencia del calzado que sería función principalmente de la superficie y de la presión de contacto.

Por tanto, la tensión de paso aplicada se expresa como:

$$V_{pa} = \frac{V_p}{(R_c + 2R_t)} \cdot R_c \quad (3.8)$$

Si se toma en cuenta que la resistencia media del cuerpo humano es $R_c = 1000 \Omega$ y $R_t = 3\rho_s$, se obtiene:

$$V_{pa} = \frac{1000}{(1000 + 6\rho_s)} \cdot V_p \quad (3.9)$$

De donde, si se desea deducir el máximo valor admisible de la tensión de paso en la instalación V_p , se debe despejar ese término de la expresión anterior y adoptar el máximo valor admisible para la tensión de paso aplicada $V_{pa \max}$.

$$V_p = \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000}\right) \cdot V_{pa \max} \quad (3.10)$$

Pero:

$$V_{pa \max} = (I_{c \max}) (R_c)$$

Donde:

$$I_{c \max} = I_K = 0.116 / \sqrt{t} \text{ para personas de 50 kg en promedio.}$$

Se obtiene finalmente:

$$V_p = (0,116 / \sqrt{t}) \cdot (1000 + 6\rho_s) \quad (3.11)$$

Se considera la resistividad de la grava (piedra picada $\rho_s = 3000$ a $8000 \Omega\text{-m}$ seco), que se acuerda debe cubrir el suelo de las subestaciones.

En el IEEE Std. N° 80 se propone una corrección a esta expresión presentada, en función al factor de la capa superficial del terreno (C_s), la cual se muestra a continuación:

$$V_p = (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (3.12)$$

Donde:

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

- ρ : Resistividad del suelo
 ρ_s : Resistividad de la capa superficial (grava)
 h_s : Espesor del piso de grava
 C_s : Factor de la capa superficial

Cabe mencionar que la expresión para el factor C_s se aproxima a 1 para capas sin superficie protectora.

3.5.-Tensión de transferencia

Es un caso especial de la tensión de toque en donde una tensión es transferida hacia el interior o exterior de la subestación desde un punto externo remoto.

Cuando ocurre una falla a tierra, existe el riesgo de transferencia de potenciales entre el área que comprende la red de tierras y puntos exteriores de la misma, incluso sin nexo metálico de unión, que pueden alcanzar valores importantes de potencial dando lugar a tensiones peligrosas, de magnitud próxima a la que presenta el sistema de puesta a tierra.

Aunque es obligatorio que los elementos metálicos que salen fuera del recinto de la instalación eléctrica estén conectados a la instalación de tierra general en varios puntos, si su extensión es grande, se debe efectuar una investigación de las tensiones transferibles por tuberías, vallas, conductores de neutro, blindaje de cables y circuitos de señalización; asimismo, se debe efectuar un estudio de las formas de reducción o eliminación.

Si se trata de instalaciones nuevas en construcción, los aspectos mencionados anteriormente se deben contemplar desde la fase inicial del proyecto, al conocerse que instalaciones, ajenas a la eléctrica, van a existir o existen en el subsuelo o en la superficie, con lo cual se habrán aplicado las soluciones adecuadas para evitar las posibles transferencias de potencial.

CAPITULO IV

PUESTA A TIERRA EN BAJA TENSION

4.1. -Esquemas de conexión a tierra en baja tensión

Se puede aplicar a toda una instalación eléctrica en baja tensión, los siguientes esquemas de conexión a tierra recomendados por norma:

- Sistema eléctrico con neutro aislado.
- Sistema eléctrico con neutro puesto a tierra.
- Sistema con las masas puestas a neutro.

Los esquemas arriba mencionados no son susceptibles de una valoración cualitativa entre ellos, con la finalidad de hallar el mejor.

4.2. -Sistema eléctrico con neutro aislado

En este sistema el neutro real o virtual flota con tensión propia sobre tierra.

- Las tensiones están referidas a tierra a través de las capacitancias parásitas.
- El retorno de corriente de falla monofásica a tierra es de pequeña intensidad.
- El sistema con neutro aislado no presenta seguridad, pero es confiable.

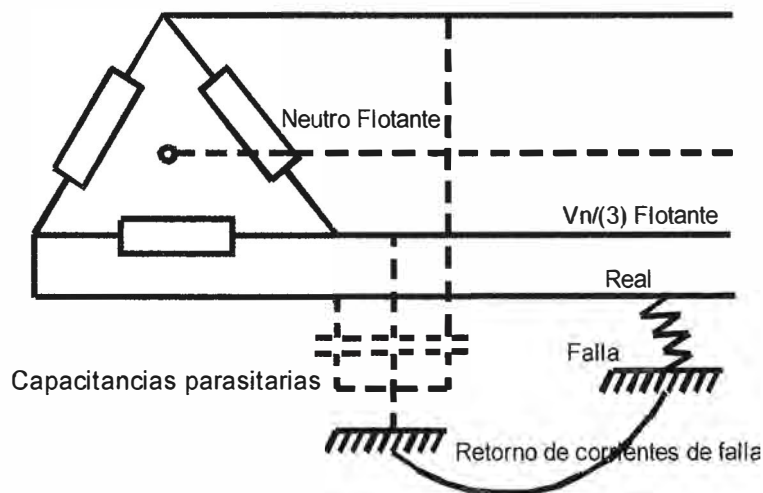


Fig. 4.1. -Retorno de corriente de falla en sistema en delta con neutro aislado

4.3.- Sistema eléctrico con neutro puesto a tierra

En este sistema el neutro real o punto de referencia y la tierra son solidarios.

Las tensiones están referidas a tierra directamente a través del neutro puesto a tierra.

El retorno de corrientes de falla es de gran intensidad.

El sistema con neutro a tierra presenta seguridad pero no confiabilidad.

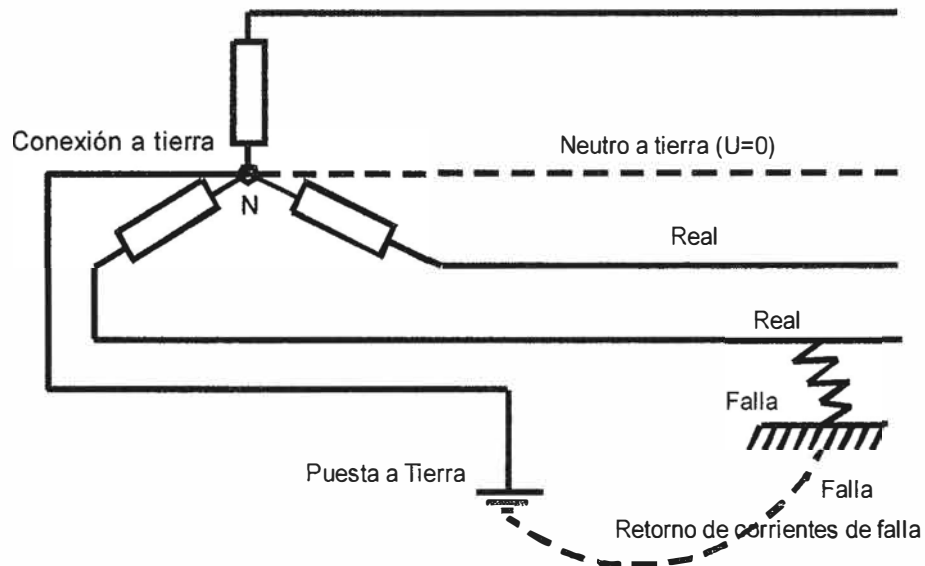


Fig. 4.2.-Retorno de corriente de falla en sistema en estrella con neutro a tierra

4.4.-Sistemas de alimentación en 220 V

Cualquiera que sea el régimen del neutro de los sistemas eléctricos, estos siempre estarán referidos indirectamente a tierra; según ello se puede estimar la porción I_k de las corrientes de falla máximas (I_f) que pueden atravesar a una persona. Aquellas corrientes admisibles cuyo valor sea superior a 50 mA serán consideradas peligrosas.

4.4.1.-Sistema 220 V con neutro aislado y sin puesta a tierra del usuario

La tensión entre los extremos de una falla a través de una persona sin resistencia de contacto con el suelo produce corrientes peligrosas I_k .

Se tiene:

$$V_f = V_n / \sqrt{3}$$

$$R_k = 1000 \Omega \text{ (resistencia promedio del cuerpo humano)}$$

$$I_k = V_n / (\sqrt{3} \cdot R_k)$$

Si existe una falla previa en uno de los conductores sanos (Falla doble), la tensión será

V_n :

$$I_k = V_n / (R_k)$$

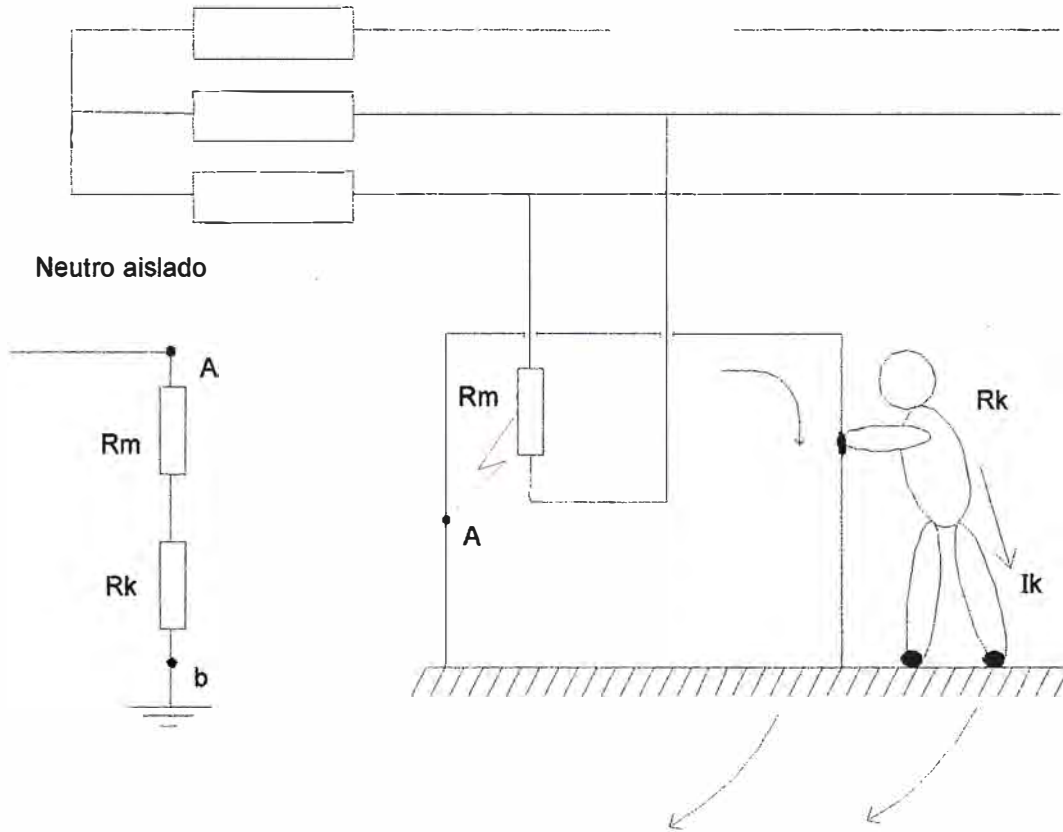


Fig. 4.3. - Falla en el circuito del usuario sin puesta a tierra

4.4.2.-Sistema 220 V con neutro aislado y con puesta a tierra del usuario

En este sistema para la falla de una fase a tierra, se obtienen corrientes I_k no peligrosas como se muestra a continuación:

$$R = R_T + R_e = R_T + (R_k)(R_m)/(R_k + R_m)$$

$$I_f = V_n / (\sqrt{3} \cdot R)$$

$$V_{AB} = I_f \cdot R_e$$

$$I_k = V_{AB} / (R_k), R_k = 1000 \Omega \text{ (resistencia promedio del cuerpo humano)}$$

$$I_k = V_n \cdot R_e / (\sqrt{3} \cdot R \cdot R_k)$$

Si existe una falla previa en uno de los conductores sanos (Falla doble), la tensión será V_n y la nueva corriente I_k se expresa como:

$$I_k = V_n \cdot R_e / (R \cdot R_k)$$

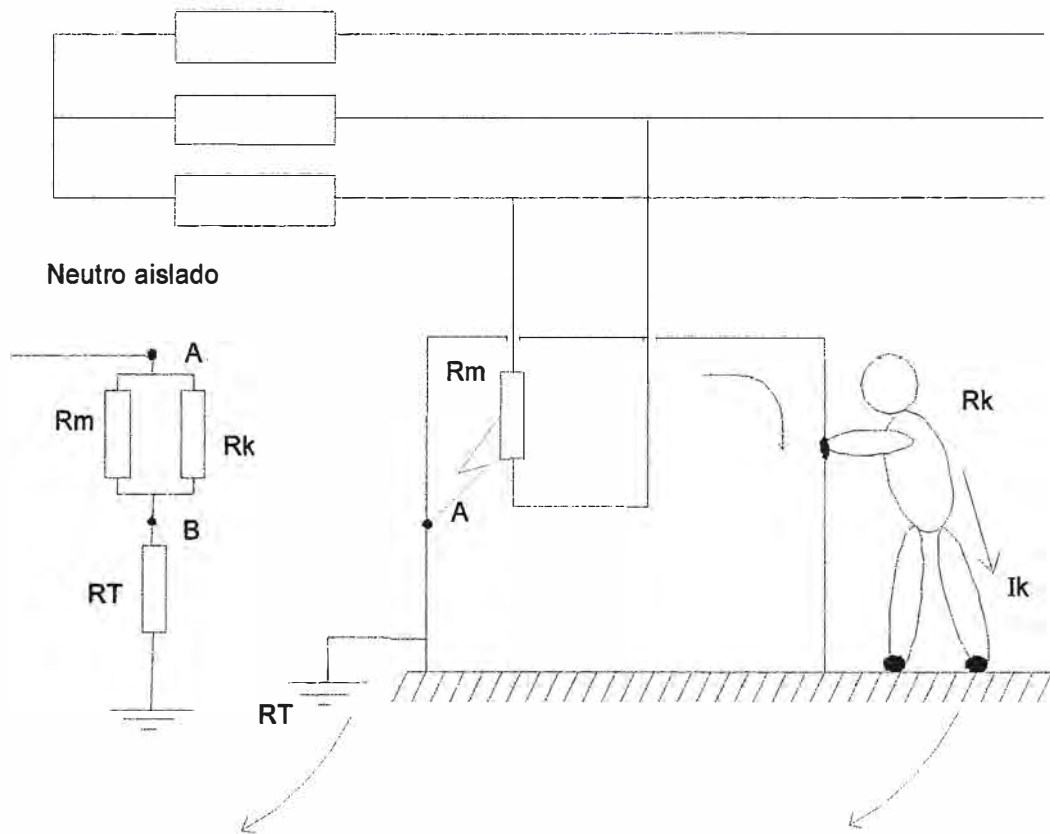


Fig. 4.4. - Falla en el circuito del usuario con puesta a tierra

4.4.3.-Sistema 220 V con neutro puesto a tierra y sin puesta a tierra del usuario

La tensión entre los extremos de una falla a través de una persona sin resistencia de contacto con el suelo $V_f = V_n / \sqrt{3}$ produce corrientes peligrosas I_k ; la protección impide la falla doble.

$$R_a = R_c + R_{ts} ; R_b = R_k + R_m \quad (R_k \gg R_m)$$

$$R_b \approx R_k$$

$$R = (R_a)(R_b)/(R_a + R_b)$$

$$R = (R_a)(R_k)/(R_a + R_k)$$

$$I_f = V_n / (\sqrt{3} \cdot R)$$

$$V_{AB} = I_f \cdot R$$

$$I_k = V_{AB} / (R_k) , R_k = 1000 \, \Omega \text{ (resistencia promedio del cuerpo humano)}$$

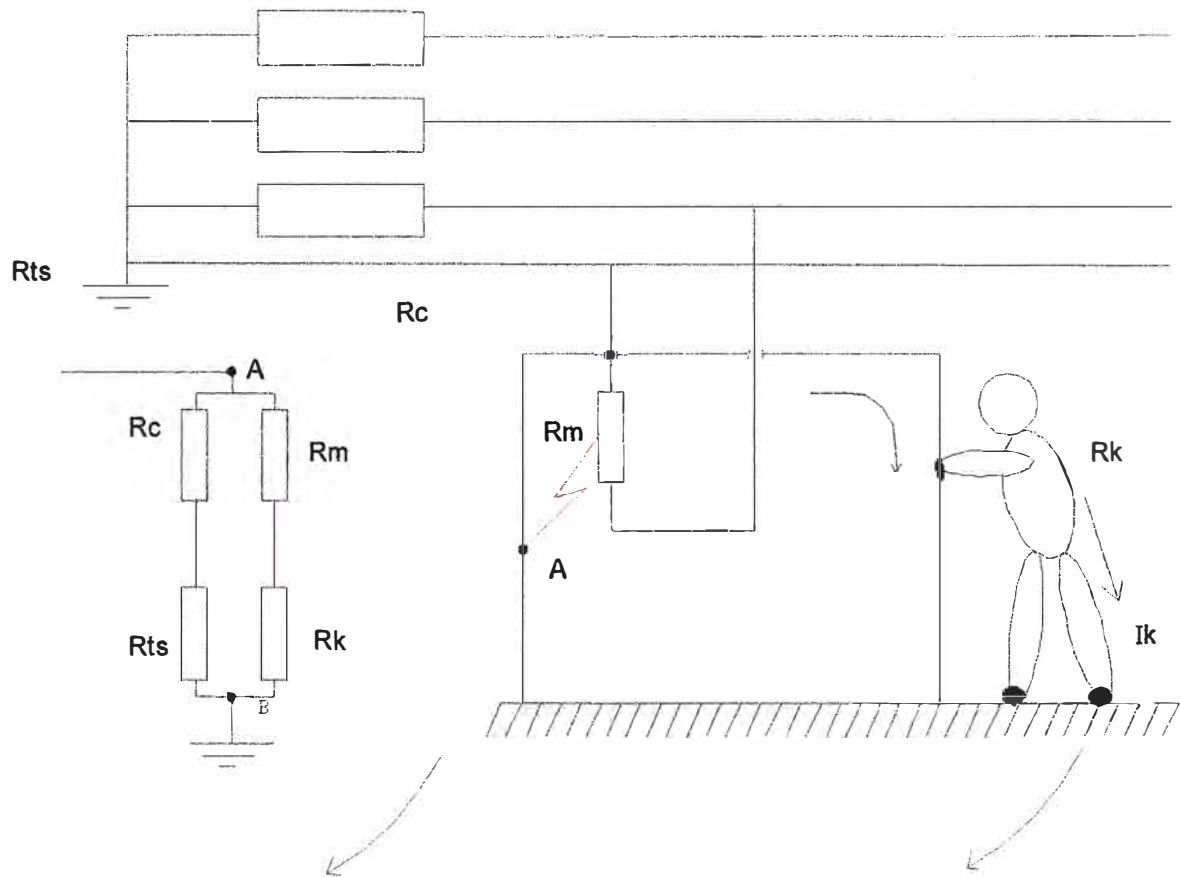


Fig. 4.5. - Falla en el circuito del usuario sin puesta a tierra

4.4.4. -Sistema 220 V con neutro puesto a tierra y con puesta a tierra del usuario

En este sistema bajo idéntica situación desventajosa (puntos de contacto $R = 0\Omega$) para la falla fase – tierra se tiene corrientes I_k no peligrosas:

$$R_a = (R_c)(R_k)/(R_c + R_k) ; R_b = R_a + R_{ts} ; R_c = R_m + R_t$$

$$R = (R_b)(R_c)/(R_b + R_c)$$

$$I_f = V_n / (\sqrt{3} \cdot R)$$

$$V_{AB} = I_f \cdot R_a$$

$$I_k = V_{AB} / (R_k) , R_k = 1000 \Omega \text{ (resistencia promedio del cuerpo humano)}$$

Será necesario proveer para las corrientes de falla, un trayecto de baja resistencia entre las masas de los aparatos eléctricos y el suelo (tierra).

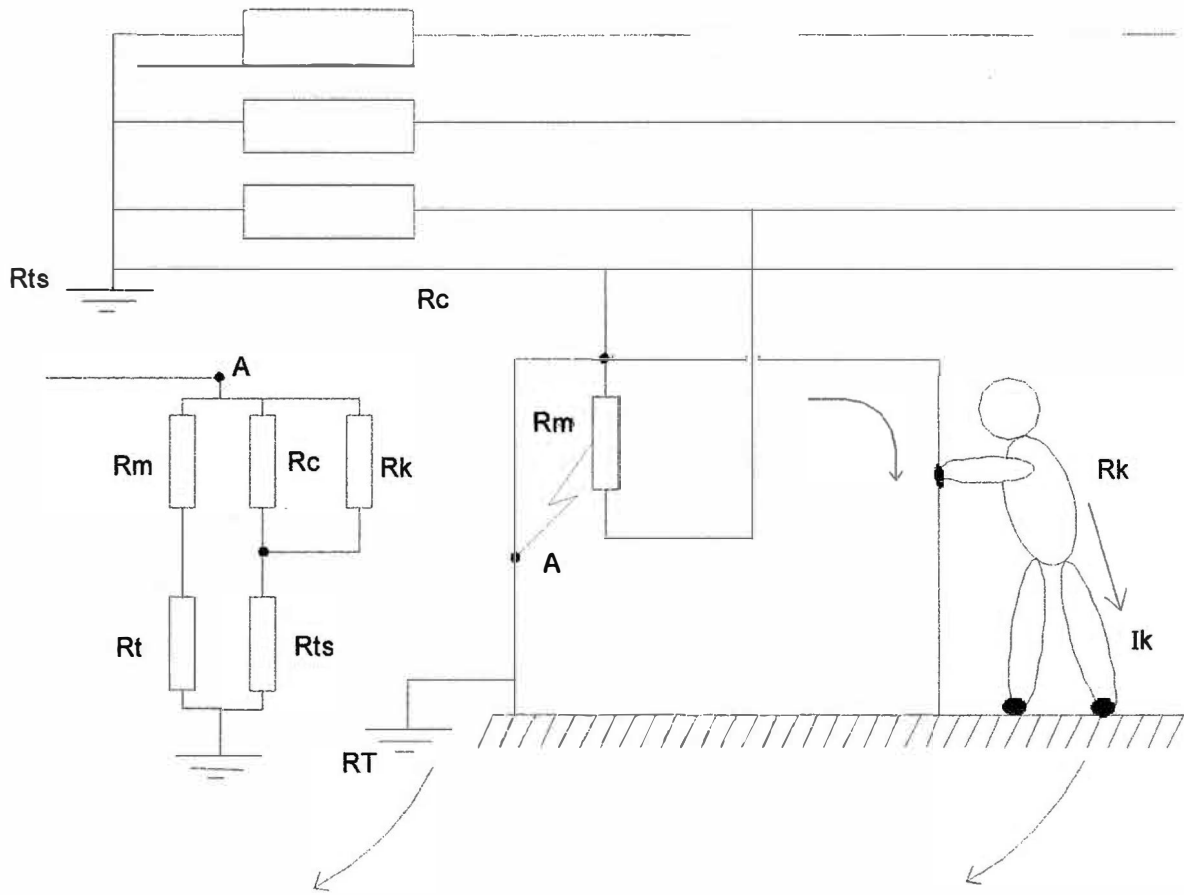


Fig. 4.6. - Falla en el circuito del usuario con puesta a tierra

4.5.- Sistema actual de la ciudad de LIMA

En la red de distribución secundaria actual de la ciudad de LIMA ninguna de las fases de suministro se encuentra conectada a tierra. El sistema 380/220 es utilizado en provincias y en Lima se está iniciando el proceso de instalación en los nuevos proyectos.

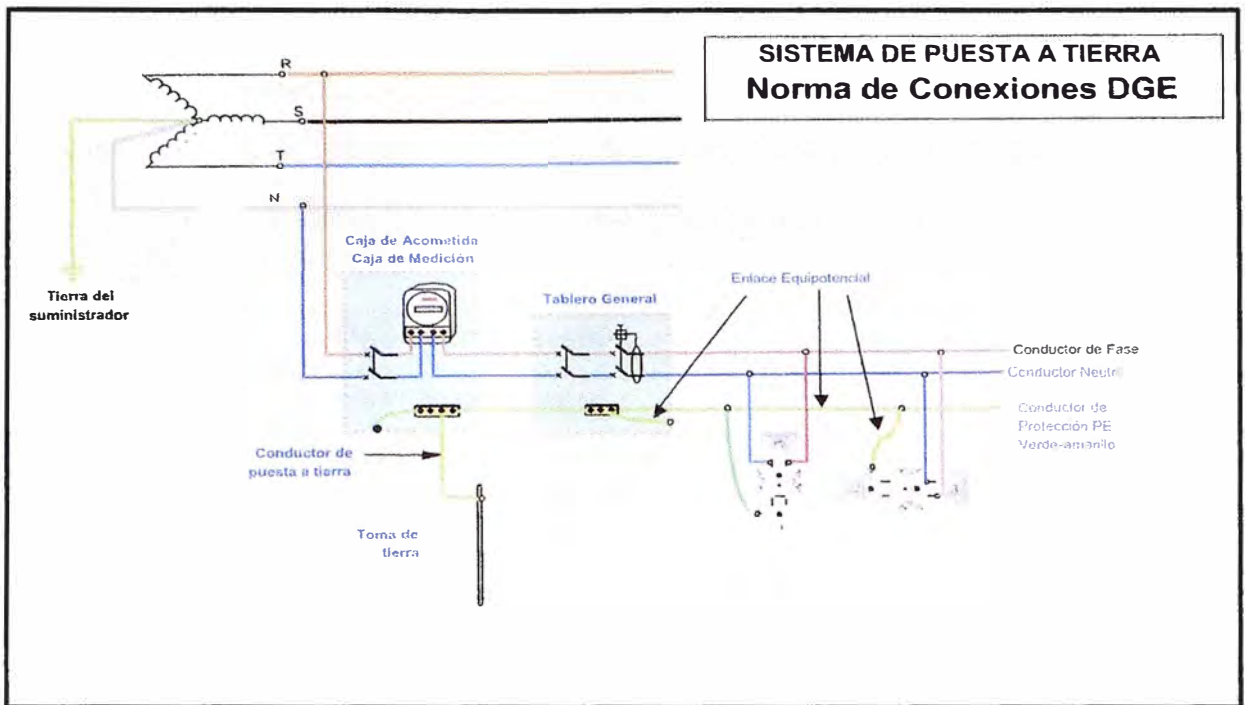


Fig. 4.7. - Esquema de distribución de puesta a tierra

4.6. En instalaciones de baja tensión

En sistemas de baja tensión con neutro multiterrado, la resistencia de puesta a tierra del neutro en los puntos más desfavorables, estando conectadas todas las puestas a tierra, no deberá superar los siguientes valores:

TABLA 4.1. Valores de resistencia urbano / rural

Tipo de localidad	Resistencia (Ω)
En centro urbano o urbano rural	$R < 6$
En localidad aislada o zona rural	$R < 10$

La puesta a tierra con un solo electrodo deberá, tener una resistencia a tierra que no exceda 25Ω . Si la resistencia con un solo electrodo excede 25Ω , deberá utilizarse dos electrodos conectados en paralelo. Referencia /7/

4.7. Resistencias de dispersión recomendables en instalaciones interiores de B.T.

Las resistencias de dispersión asignables según las necesidades de seguridad y correcto funcionamiento de aparatos eléctricos y electrónicos se indican a continuación:

TABLA 4.2. Resistencias de los tipos de instalación

Tipo de Instalación	Resistencia (Ω)
Servicio doméstico	9 – 15
Servicio doméstico moderno	6 – 9
Servicio de oficina	3 – 6
Servicio red de procesamiento	2 – 3
Servicio de comunicaciones	$R < 2$
Servicio médico	$R < 2$
Descargas atmosféricas	$R < 2$

Referencia /13/

4.8.- Puesta a tierra en sistemas de distribución

Los conductores de puesta a tierra de un sistema con un electrodo o conjuntos de electrodos con un solo punto de puesta a tierra, excluyendo las tierras en acometidas individuales, tendrán una capacidad de corriente de corta duración adecuada para la corriente de falla que pueda presentarse en los conductores de puesta a tierra según los tiempos de operación de los dispositivos de protección. Si este valor no puede ser determinado fácilmente, la capacidad continua de corriente de los conductores de puesta a tierra no será inferior a la corriente de plena carga del transformador de suministro o de otra fuente de suministro. Si se utiliza una puesta a tierra en el lado de alta tensión del transformador y una puesta a tierra en el lado de baja tensión del transformador, siendo ambos sistemas de puesta a tierra independientes entre si (no debe existir alguna conexión física entre ellos).

Las varillas diseñadas para puesta a tierra pueden ser de sección no circular; su longitud total no será inferior a 2,0 m, diámetro no inferior a 16 mm para cobre.

Se puede utilizar varillas más largas o varillas múltiples para reducir la resistencia de puesta a tierra. La separación entre varillas múltiples no debe ser inferior a 2,0 m o la longitud de la varilla.

4.9. – Esquemas de puestas a tierra en baja tensión

4.9.1. - Esquemas de puestas a tierra convencional

Estos pozos a tierra se realizaban anteriormente y en la actualidad aun se sigue utilizando, pero tienen sus desventajas porque se tiene que utilizar carbón vegetal y sal industrial (NaCl), la sal es corrosiva y al utilizar el carbón se tiene que depredar los bosques.

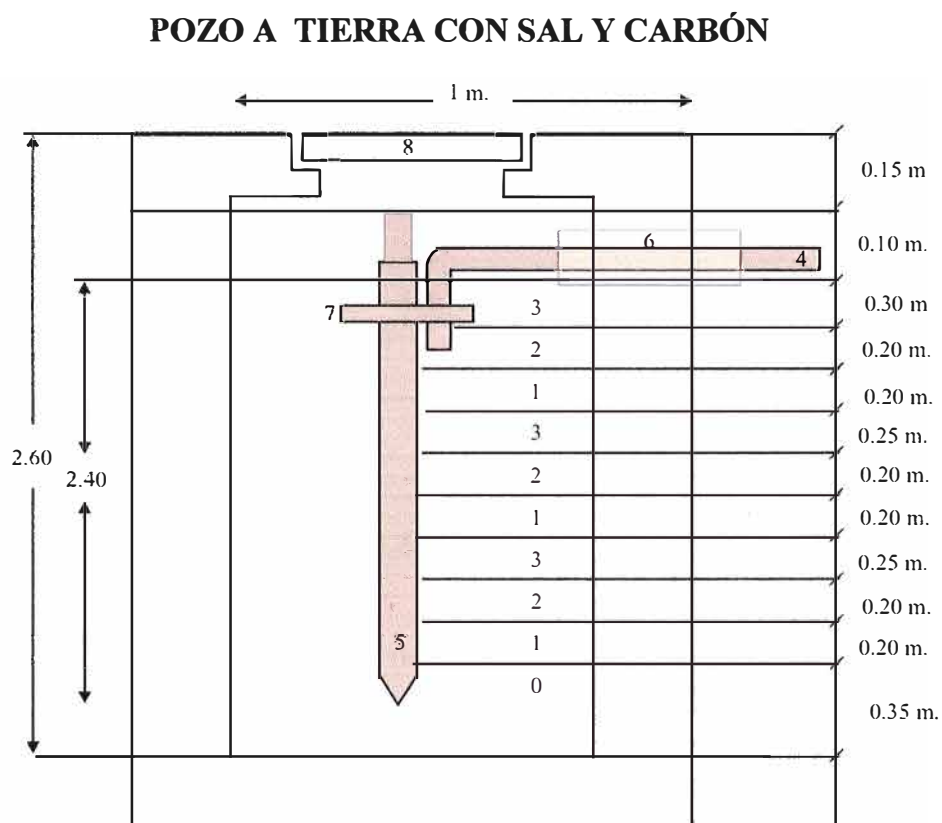


Fig. 4.7. Pozo de tierra

- (0) Tierra Sernida
- (1) Sal
- (2) Carbon
- (3) Tierra Sernida
- (4) Conductor de Cobre de 35 mm², 5 m. De longitud
- (5) Electrodo de cobre de 2.4 m de longitud y 16 mm. De diametro
- (6) Tubo de PVC 2" de diametro

- (7) Conector
- (8) Caja de registro de concreto

4.9.2.-Esquemas de puestas a tierra moderno

En los pozos a tierra actuales se están utilizando técnicas modernas de aterramiento, utilizando gel , cemento conductivo GEO-GEM y un conjunto de sales especiales , logrando así mayor eficiencia y protección de los aterramientos y además no se contamina y no se depreda.

POZO A TIERRA CON TECNOLOGÍA MODERNA

- 1.- Excavar un pozo de 1.2mt de diámetro x 2.40mt de profundidad.

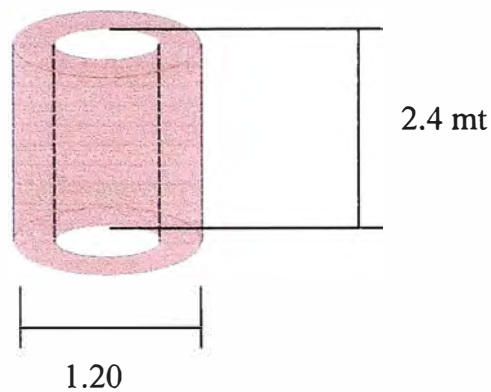


Fig. 4.8. Pozo de tierra

- 2.- Colocar el electrodo en el centro del pozo.

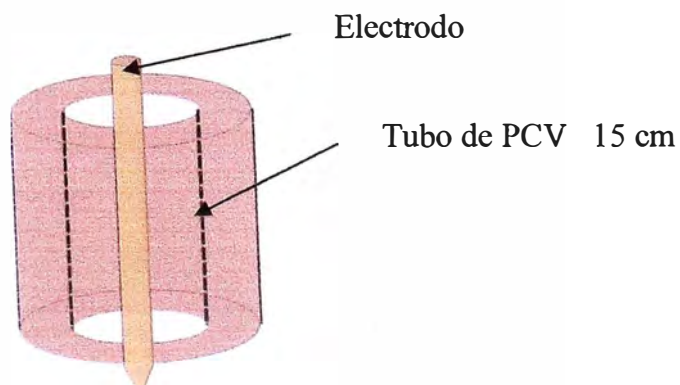


Fig. 4.9. Pozo de tierra con electrodo

3.- Con la ayuda del tubo de PVC de 15 cm. de diámetro, el cual se debe de ir retirando se va llenando el pozo. Cubra el electrodo con GEO-GEN completamente y rellenar la parte exterior del tubo con la misma tierra extraída, limpiando las piedras e impurezas.

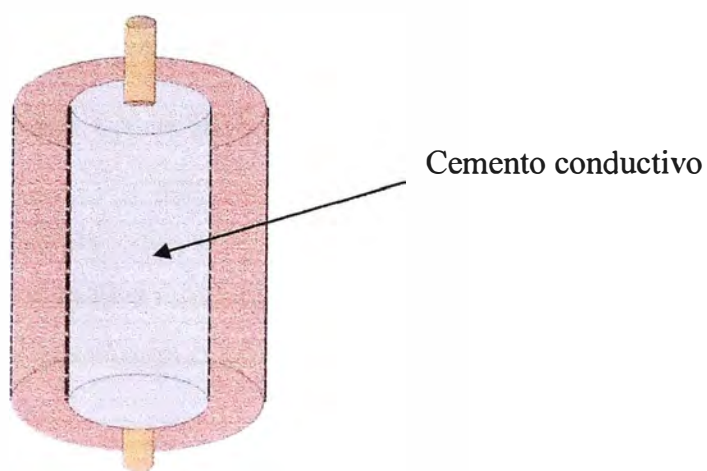


Fig. 4.10. Pozo de tierra con electrodo y cemento conductor.

CAPITULO V

PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES DE POTENCIA

5.1. -Expresión inicial preliminar.

En redes de puesta a tierra con mallas regulares o irregulares, se utilizan las expresiones de LAURENT y NIEMANN basadas en el principio de la placa metálica superpuesta.

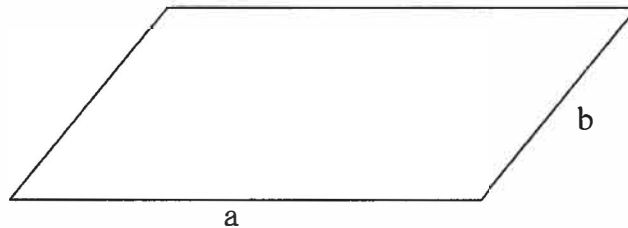


Fig. 5.1. - Placa metálica de dimensiones similares al área disponible

Los resultados dan una estimación preliminar para la resistencia del aterramiento y se muestran a continuación:

$$R_T = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (5.1)$$

Donde:

r : radio del círculo de igual cobertura $S = a.b$, $S = \pi.r^2$

a, b : lados de la placa (m).

L : longitud total del desarrollo del conductor enterrado (m).

Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene finalmente:

$$R_T = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \rho}{4\sqrt{a.b}} + \frac{\rho}{L} \quad (5.2)$$

Esta expresión se aplica en mallas enterradas a menos de 0,25m de profundidad y resistividad del suelo uniforme baja ($\rho < 200 \Omega\cdot m$).

Para mallas enterradas con una profundidad entre 0,25m y 2,5m, se requiere corregir la fórmula, la cual quedará de esta forma:

$$R_T = \rho \cdot \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20ab}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{ab}}} \right) \right] \quad (5.3)$$

Donde:

- h : profundidad de la malla (m)
a : largo del área disponible (m)
b : ancho del área disponible (m).
ρ : resistividad del suelo (Ω-m)
L : longitud total del desarrollo del conductor enterrado(m).

5.2.- Diseño de puestas a tierra en subestaciones

En el diseño de puestas a tierra de protección en subestaciones se hace necesario tener algunos datos del proyecto, que se indican a continuación.

TABLA 5.1. Datos necesarios previos

DATOS	UNIDAD
Corriente de falla	I_f (kA)
Tiempo de despeje de la falla	t_c (s)
Factor de dispersión de Corriente	f_{disp}
Resistividad de la grava	ρ_s (Ω - m)
Profundidad de la malla	h (m)
Área disponible para la malla en la S.E.	A x B (m ²)
Largo del terreno teórico	A (m)
Ancho del terreno teórico	B (m)
Sección del conductor de tierra	S (mm ²)
Espesor del piso de grava	h_s (m)
Resistividad equivalente de diseño	ρ_{equi} (Ω - m)
Resistencia de dispersión requerida	R_o (Ω)

En lo referido a la resistividad equivalente de diseño, se pueden presentar mediciones de campo en las cuales las resistividades eléctricas de la estratificación del terreno sean bastantes altas; por lo tanto, se hace necesario reemplazar el terreno existente en la subestación, por terreno de cultivo, cuyo valor de resistividad eléctrica no deberá ser mayor a $100 \Omega \cdot m$.

5.2.1.-Determinar máximas tensiones de toque y paso admisibles (Tolerables)

Las expresiones para determinar las máximas tensiones de toque y paso tolerables se muestran a continuación:

$$V_{TT} = (1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (5.4)$$

$$V_{PT} = (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (5.5)$$

Donde:

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

ρ : Resistividad del suelo

ρ_s : Resistividad de la capa superficial (grava)

h_s : Espesor del piso de grava

C_s : Factor de la capa superficial

V_{TT} : $V_{\text{toque admisible}}$

V_{PT} : $V_{\text{paso admisible}}$

5.2.2.-Determinar la sección nominal del conductor enterrado (S_o)

Se determina la sección nominal del conductor enterrado utilizando la siguiente expresión:

$$S_o = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{T_{CAP} \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \text{Ln} \left(\frac{ko + Tm}{ko + Ta} \right)}} \quad (5.6)$$

Donde:

I_f	: Corriente de falla	(kA)
S_0	: Sección nominal del conductor	(mm ²)
T_m	: Temperatura máxima admisible	(°C)
T_a	: Temperatura ambiente	(°C)
α_r	: Coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de 20 °C	(¹ /°C)
ρ_r	: Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de 20 °C	($\mu \Omega$ - m)
k_0	: Factor a 0°C	(°C)
t_c	: Duración de la corriente de falla	(seg)
T_{CAP}	: Capacidad térmica por unidad de volumen	(J/ cm ³ .°C)

De la Tabla N°1 – Constantes de Materiales (IEEE Std 80) para el cobre:

$$\alpha_r = 0,00393$$

$$k_0 = 234 (0^\circ\text{C})$$

T_m : 1083 °C : Temperatura de fusión del cobre, sin embargo para los cálculos se considera $T_m = 200^\circ\text{C}$, valor de temperatura máxima para uniones con conectores.

$$\rho_r = 1,72 \mu \Omega\text{- m}$$

$$T_{CAP} = 3,42 \text{ J/cm}^3\text{.}^\circ\text{C}$$

5.2.3.-Ajuste de la configuración de la puesta a tierra

En primer lugar, se aproxima ($N+1$) conductores transversales paralelos con separación (D):

$$N = (L \text{ arg o.del terreno}) / (\text{Separación}) = A / D \quad (5.7)$$

A continuación, se determina la resistencia de dispersión preliminar R_g y se verifica (I_f) (R_g) < V_{TT} ; Luego se calcula V_{TR} y se debe verificar $V_{TR} \leq V_{TT}$, en caso no cumpla con la restricción, se aproxima ($N'+1$) conductores longitudinales paralelos formando cuadrículas.

$$N' = (\text{Ancho.del terreno}) / (\text{Separación}) = B / D \quad (5.8)$$

Se recalcula V_{TR} y se debe verificar nuevamente $V_{TR} \leq V_{TT}$. En caso se cumpla, se calcula V_{PR} y se debe verificar $V_{PR} \leq V_{PT}$

Donde:

I_f	: Corriente de falla	(kA)
S_o	: Sección nominal del conductor	(mm ²)
T_m	: Temperatura máxima admisible	(°C)
T_a	: Temperatura ambiente	(°C)
α_r	: Coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de 20 °C	(¹ /°C)
ρ_r	: Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de 20 °C	($\mu \Omega$ - m)
k_o	: Factor a 0°C	(°C)
t_c	: Duración de la corriente de falla	(seg)
T_{CAP}	: Capacidad térmica por unidad de volumen	(J/ cm ³ .°C)

De la Tabla N°1 – Constantes de Materiales (IEEE Std 80) para el cobre:

$$\alpha_r = 0,00393$$

$$k_o = 234 (0^\circ\text{C})$$

T_m : 1083 °C : Temperatura de fusión del cobre, sin embargo para los cálculos se considera $T_m = 200^\circ\text{C}$, valor de temperatura máxima para uniones con conectores.

$$\rho_r = 1,72 \mu \Omega\text{- m}$$

$$T_{CAP} = 3,42 \text{ J/cm}^3\text{.}^\circ\text{C}$$

5.2.3.-Ajuste de la configuración de la puesta a tierra

En primer lugar, se aproxima ($N+1$) conductores transversales paralelos con separación (D):

$$N = (L \text{ arg o.del terreno}) / (\text{Separación}) = A / D \quad (5.7)$$

A continuación, se determina la resistencia de dispersión preliminar R_g y se verifica (I_f) (R_g) < V_{TT} ; Luego se calcula V_{TR} y se debe verificar $V_{TR} \leq V_{TT}$, en caso no cumpla con la restricción, se aproxima ($N'+1$) conductores longitudinales paralelos formando cuadrículas.

$$N' = (\text{Ancho.del terreno}) / (\text{Separación}) = B / D \quad (5.8)$$

Se recalcula V_{TR} y se debe verificar nuevamente $V_{TR} \leq V_{TT}$. En caso se cumpla, se calcula V_{PR} y se debe verificar $V_{PR} \leq V_{PT}$

Finalmente, cuando no se verifique $V_{TR} \leq V_{TT}$ y $V_{PR} \leq V_{PT}$ se agregan varillas. Se recalcula V_{TR} , V_{PR} y se verifica nuevamente $V_{TR} \leq V_{TT}$ y $V_{PR} \leq V_{PT}$. En caso se cumpla con las restricciones se determina R_g preciso y se exponen los resultados.

5.2.4.-Tensiones de toque y paso de la malla

5.2.4.a. -Tensión de toque de la malla

$$V_{TR} = \frac{km.ki.\rho.I_G}{L_M} \quad (5.9)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16.h.d} + \frac{(D+2.h)^2}{8.D.d} - \frac{h}{4.d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2.n-1)} \right] \right] \quad (5.10)$$

Donde:

K_m : Factor geométrico o de espacio para la tensión de toque.

d : diámetro del conductor de la malla

D : separación entre conductores paralelos

h : Profundidad de la malla

V_{TR} : V_{Toque} de malla

Para mallas con varillas de puesta a tierra a lo largo del perímetro o para mallas con varillas de puesta a tierra en las esquinas de la malla, asimismo ambos a lo largo del perímetro y a través del área de la malla se considera:

$$K_{ii} = 1$$

Para mallas con ninguna varilla de puesta a tierra o mallas solo con unas pocas varillas de puesta a tierra ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro, se considera:

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

Además:

$$K_h = \sqrt{\left(1 + \frac{h}{h_o}\right)}$$

h_o : Profundidad referencial de la malla (se considera $h_o = 1\text{ m}$)

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$n_a = 2 \frac{L_C}{L_P}$$

L_C : Longitud de conductores horizontales de la malla (m)

L_P : Longitud del perímetro de la malla (m).

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{AB}}}$$

Para el caso de mallas cuadradas y rectangulares $n_c = n_d = 1$

L_M : Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de toque.

$$L_M = L_C + \left(1,55 + \frac{1,22L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}\right) \cdot L_R \quad (5.11)$$

L_r : Longitud de cada varilla de puesta a tierra (m)

L_x : Máxima longitud de la malla en la dirección x (m)

L_y : Máxima longitud de la malla en la dirección y (m)

L_R : Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra (m)

K_i : Factor de corrección por irregularidad.

$$K_i = 0.644 + 0.148 n$$

I_G : Máxima corriente de malla

$$I_G = (\text{factor}_{disp}) \cdot I_f$$

5.2.4.b.-Tensión de paso de la malla

$$V_{PR} = \frac{ks.ki.\rho.I_G}{L_S} \quad (5.12)$$

Donde:

K_S : Factor de espacio para la tensión de paso

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2.h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (5.13)$$

h : Profundidad de la malla ($0,25m \leq h \leq 2,5m$)

K_i : Factor de corrección por irregularidad.

$$K_i = 0.644 + 0.148 n$$

L_S : Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de paso.

$$L_S = 0,75L_C + 0,85.L_R$$

$$n = n_a.n_b.n_c.n_d$$

L_C : Longitud de conductores horizontales de la malla (m)

L_R : Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra (m)

I_G : Máxima corriente de malla

$$I_G = (\text{factor}_{disp}).I_f$$

V_{PR} : V Paso de malla

5.2.5.-Resistencia de la malla para la subestación

$$R_{malla} = \frac{\rho_{eq}}{\pi L_C m} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{\sqrt{hd}} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{AB}} - k_2 \right] \quad (5.14)$$

Donde:

m : Factor de tratamiento del suelo ($3 < m < 8$)

$$k_1 = 1,43 - \frac{2,3h}{\sqrt{AB}} - 0,044 \left(\frac{A}{B} \right) \quad \text{Coeficiente de forma 1}$$

$$k_2 = 5,5 - \frac{8h}{\sqrt{AB}} + \left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{AB}} \right) \frac{A}{B} \quad \text{Coeficiente de forma 2}$$

R_1 : R_{malla}

5.2.6.-Resistencia de las varillas para la subestación

$$R_j = \frac{\rho_{eq}}{2\pi n_v L_R m} \left[\ln\left(\frac{4L_R}{b}\right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{AB}} (\sqrt{n_v} - 1)^2 \right] \quad (5.15)$$

Donde:

- m : Factor de tratamiento del suelo ($3 < m < 8$)
- ρ_{eq} : Resistividad equivalente del terreno
- L_r : Longitud de cada varilla de puesta a tierra (m)
- L_R : Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra (m)
- n_v : Número de varillas
- b : Radio de la varilla
- k_1, k_2 : Coeficientes de forma 1 y 2 respectivamente
- R_2 : R_j

5.2.7.-Resistencia mutua malla – varillas para la subestación

$$R_j = \frac{\rho_{eq}}{\pi L_C m} \left[\ln\left(\frac{2L_C}{L_r}\right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{AB}} - k_2 + 1 \right] \quad (5.16)$$

R_m : R_j

5.2.8.-Resistencia de dispersión total para la subestación

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 R_m} \quad (5.17)$$

- R_1 : Resistencia de la malla
- R_2 : Resistencia de las varillas
- R_m : Resistencia mutua entre la malla y varillas
- R_g : Resistencia total de la subestación

5.2.9.-Potencial máximo de dispersión para la subestación

$$V_{MD} = (I_f)(R_g) \quad (5.18)$$

5.2.10.-Resultados finales

TABLA 5.2. Unidades de los resultados

DESCRIPCIÓN	SUBESTACIÓN
Área de la Malla	m ²
Largo de Malla	m
Ancho de Malla	m
Espaciamiento lado mayor	m
Espaciamiento lado menor	m
Número de varillas	
Resistencia Total	Ω

5.3.- Aplicación para una subestación de alta tensión

TABLA 5.3. Datos Iniciales

DATOS	UNIDAD	VALORES
Corriente de falla	I _f (kA)	10
Tiempo de despeje de la falla	t _c (s)	0.25
Factor de dispersión de Corriente	f _{disp}	0.45
Resistividad de la grava	ρ _s (Ω - m)	3000
Profundidad de la malla	h (m)	0.8
Área disponible para la malla en la S.E.	A x B (m ²)	1400
Largo del terreno teórico	A (m)	40
Ancho del terreno teórico	B (m)	35
Espesor del piso de grava	h _s (m)	0.1
Resistividad equivalente de diseño	ρ _{equi} (Ω - m)	100
Resistencia de dispersión requerida	R _o (Ω)	1

De acuerdo a los datos proporcionados, se determina las máximas tensiones de toque y paso admisibles siguientes:

TABLA 5.4. Tensiones Máximas de Toque y Paso admisible.

Factor de la capa superficial	C_s	0.70
$V_{\text{Toque admisible}}$	V_{TT}	962.800
$V_{\text{Paso admisible}}$	V_{PT}	3155.200

Luego, se determina la sección nominal mínima del conductor enterrado utilizando los datos para el cobre según el IEEE Std. 80:

TABLA 5.5. Sección Mínima Calculada

Temperatura máxima admisible ($^{\circ}\text{C}$)	T_m	200
Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	T_a	30
Coefficiente térmico de la resistividad a la temperatura de 20°C ($1/^{\circ}\text{C}$)	α_r	0.00393
Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de 20°C ($\mu\Omega\text{-m}$)	ρ_r	1.72
Factor a 0°C ($^{\circ}\text{C}$)	k_o	234
Duración de la corriente (s)	t_c	0.25
Capacidad térmica por unidad de volumen ($\text{J}/\text{cm}^3\text{.}^{\circ}\text{C}$)	T_{CAP}	3.42
Sección nominal del conductor (mm^2)	S_o	31.528

Las normas VDE indican que el valor máximo de temperatura admisible es 200°C para el cobre en lugar de utilizar la temperatura de fusión del cobre 1083°C .

La sección obtenida corresponde a un conductor N° 2 AWG ($33,63 \text{ mm}^2$). Entonces, para la subestación, el conductor de cobre a utilizar tendrá una sección normalizada $33,63 \text{ mm}^2$, el cual tiene un diámetro: $d = 0.0065 \text{ m}$.

Normalmente por esfuerzos mecánicos, electrodinámicos y durabilidad se utilizan secciones mayores ($53.48 \text{ mm}^2 - 67.43 \text{ mm}^2$).

Se procede al ajuste de la configuración de la puesta a tierra

En primer lugar, se aproxima ($N+1$) conductores transversales paralelos con separación (D):

$$N = (\text{Larg o.del.terreno}) / (\text{Separación}) = A / D$$

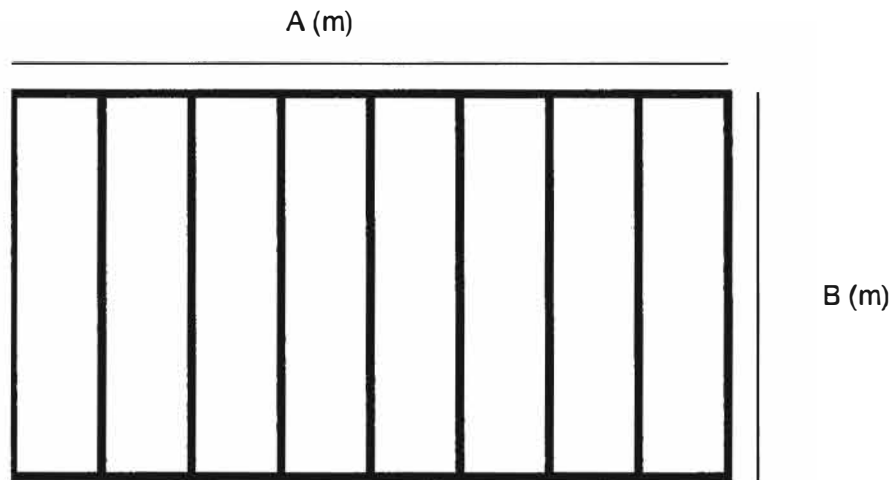


Fig. 5.2. – Reticulado Inicial

A continuación, se determina la resistencia de dispersión preliminar R_g y se debe verificar $(I_f)(R_g) < V_{TT}$.

Tabla 5.6 Valor de la Resistencia Preliminar

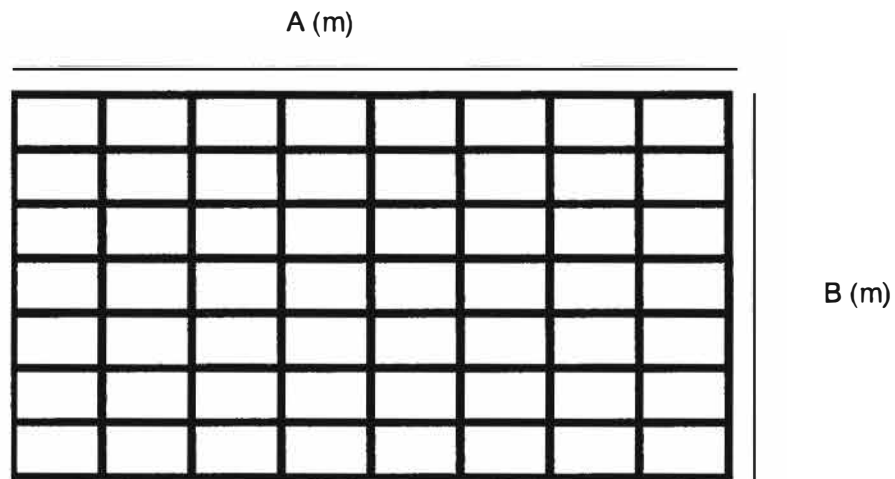
Corriente de falla para la subestación	I_f (kA)	10
Resistencia de dispersión preliminar	R_g (Ω)	1,396
Potencial máximo de dispersión	V_{MD} (V)	13962

Como $V_{MD} \gg V_{TT}$ y no se verifica $I_f R_g < V_{TT}$, entonces se calcula V_{TR} y se debe verificar $V_{TR} \leq V_{TT}$ para lo cual se muestra la siguiente tabla de cálculos efectuados:

Tabla 5.7 Primer Valor Calculado de Tensión de Toque de Malla

Separación entre conductores paralelos	D	5
	Kii	0.409
Profundidad referencial de la malla	ho	1
	K _h	1.342
Longitud de conductores horizontales de la malla	L _c	395
Longitud del perímetro de la malla	L _p	150
	na	5.267
	nb	1.001
	nc	1
	nd	1
Factor geométrico	n	5.273
Longitud de cada varilla de puesta a tierra	L _r	0.000
Máxima longitud de la malla en la dirección x	L _x	40
Máxima longitud de la malla en la dirección y	L _y	35
Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra	L _R	0.000
Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de toque	L _M	395.000
Factor geométrico o de espacio para la tensión de toque	K _m	0.904
Factor de corrección por irregularidad	K _i	1.424
Máxima corriente de malla	I _G	4.500
V _{Toque de malla}	V _{TR}	1466,241

De los resultados obtenidos anteriormente, se determina que $V_{TR} = 1466,241 \text{ V}$ y no se cumple con la restricción $V_{TR} \leq V_{TT}$, por lo cual se aproxima $(N'+1)$ conductores longitudinales paralelos formando cuadrículas.



$$N' = (\text{Ancho.del.terreno}) / (\text{Separación}) = B / D$$

Fig. 5.3. – Agregamos barras horizontales en el Reticulado Inicial

Luego se calcula V_{TR} y se debe verificar $V_{TR} \leq V_{TT}$, para lo cual se muestra la siguiente tabla de cálculos efectuados:

Tabla 5.8 Nuevo Cálculo de la Tensión de Toque de Malla

Separación entre conductores paralelos	D	5
	Kii	0.513
Profundidad referencial de la malla	ho	1
	K _h	1.342
Longitud de conductores horizontales de la malla	Lc	635
Longitud del perímetro de la malla	Lp	150
	na	8.467
	nb	1.001
	nc	1
	nd	1
Factor geométrico	n	8.476
Longitud de cada varilla de puesta a tierra	Lr	0.000
Máxima longitud de la malla en la dirección x	Lx	40
Máxima longitud de la malla en la dirección y	Ly	35
Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra	L _R	0.000
Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de toque	L _M	635.000
Factor geométrico o de espacio para la tensión de toque	Km	0.856
Factor de corrección por irregularidad	Ki	1.898
Máxima corriente de malla	I _G	4.500
V _{Toque de malla}	V _{TR}	1151,797

De los resultados obtenidos anteriormente, se determina que $V_{TR} = 1151,797 \text{ V}$ y no se cumple con la restricción $V_{TR} \leq V_{TT}$, por lo cual se procede a agregar varillas de puesta a tierra.

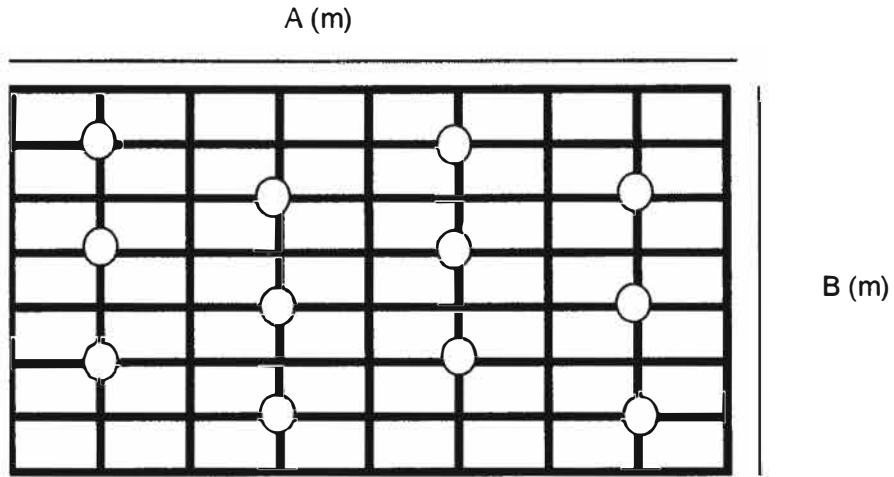


Fig. 5.4. – Agregamos electrodos verticales en el Reticulado anterior

Luego se calcula V_{TR} y se debe verificar $V_{TR} \leq V_{TT}$, para lo cual se muestra la siguiente tabla de cálculos efectuados:

Tabla 5.9 Cálculo de la Tensión de Toque de Malla con electrodos verticales

Separación entre conductores paralelos	D	5
	Kii	1
Profundidad referencial de la malla	ho	1
	K _h	1.342
Longitud de conductores horizontales de la malla	Lc	635
Longitud del perímetro de la malla	Lp	150
	na	8.467
	nb	1.001
	nc	1
	nd	1
Factor geométrico	n	8.476
Longitud de cada varilla de puesta a tierra	Lr	2.438
Máxima longitud de la malla en la dirección x	Lx	40
Máxima longitud de la malla en la dirección y	Ly	35
Longitud total de todas las varillas de puesta a tierra	L _R	29.261
Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de toque	L _M	681.992
Factor geométrico o de espacio para la tensión de toque	Km	0.750
Factor de corrección por irregularidad	Ki	1.898
Máxima corriente de malla	I _G	4.500
V _{Toque de malla}	V _{TR}	939,594

De los resultados obtenidos anteriormente, se determina que $V_{TR} = 939.594 \text{ V}$ y se cumple con la restricción $V_{TR} \leq V_{TT}$, por lo cual se procede a verificar $V_{PR} \leq V_{PT}$ para lo cual se muestra la siguiente tabla de cálculos efectuados:

Tabla 5.10 Cálculo de la tensión de paso de Malla Final

Factor de espacio para la tensión de paso	K_s	0.317
Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de paso	L_s	501.122
$V_{\text{Paso de malla}}$	V_{PR}	540,030

Conforme a los resultados obtenidos en la tabla, se observa que $V_{PR} = 540,03 \text{ V}$ y se cumple con la restricción $V_{PR} \leq V_{PT}$, por lo cual se procede a determinar la resistencia total para la subestación (R_g) preciso y se exponen los resultados en la siguiente tabla.

Tabla 5.11 Cálculo de la Resistencia Total de la Subestación

factor de tratamiento	m	3
Coefficiente de forma 1	k_1	1.331
Coefficiente de forma 2	k_2	5.476
Resistencia de la malla para la SE	R_{malla}	0,449
Diámetro de la varilla	b'	0.016
Radio de la varilla	b	0.008
Número de varillas	n_v	12
Resistencia de las varillas para la SE	R_j	0,146
Resistencia mutua malla - varillas para la SE	R_m	0,407
Resistencia Total a tierra para la SE	R_g	0,457

: Conforme a los resultados obtenidos en la tabla anterior, se determina la resistencia total para la subestación $R_g = 0,457\Omega$ utilizando las expresiones de SCHWARZ. Este valor obtenido es menor a la resistencia de dispersión requerida $R_o = 1\Omega$, por lo cual no es necesario reconsiderar más cálculos.

Se determina el potencial máximo de dispersión

Tabla 5.12 Valor del Potencial Máximo de Dispersión Calculado

Potencial máximo de dispersión	V_{MD}	4572,544
--------------------------------	----------	----------

Este valor V_{MD} es mayor a la V_{TT} , pero puede aceptarse debido a que no supera los 5000 V que es lo recomendable de acuerdo con prácticas internacionales. Además, se han realizado los respectivos cálculos para las tensiones de toque y paso de la malla propuesta y verifican las restricciones pertinentes.

5.3.1.-Recomendaciones

Los calibres mínimos recomendados para el conductor de puesta a tierra en subestaciones se pueden aumentar no solo para disminuir la impedancia sino también para incrementar la resistencia mecánica del conductor y la durabilidad del mismo.

Las primeras guías del IEEE recomiendan un calibre N° 1/0 AWG y 2/0 AWG de conductor de cobre para juntas soldadas y atornilladas respectivamente. Un reciente estudio internacional, ha mostrado que cerca del 66% de las utilidades cuestionadas utilizan conductor de cobre calibre N° 4/0 AWG para la red y aproximadamente el 16% prefiere utilizar conductores tan grandes como 500 MCM. Por otro lado, cerca del 25% de las utilidades, reportan el uso de conductores de cobre tan pequeños como N° 1/0 AWG sin presentar problemas mecánicos./14/

Finalmente, la sección nominal mínima recomendable para nuestra aplicación en particular es N° 2/0 AWG ($67,43 \text{ mm}^2$), este valor esta de acuerdo con prácticas internacionales.

A continuación se presentan los valores obtenidos para la sección de conductor recomendada:

Tabla 5.13 Valores de los parámetros recomendados

Diámetro del conductor	D	0.009
$V_{\text{Toque admisible}}$	V_{TT}	962.800
$V_{\text{Paso admisible}}$	V_{PT}	3155.200
Separación entre conductores paralelos	D	5
Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de toque	L_{M}	681.992
Factor geométrico o de espacio para la tensión de toque	K_{m}	0.694
Factor de corrección por irregularidad	K_{i}	1.898
Máxima corriente de malla	I_{G}	4.500
$V_{\text{Toque de malla}}$	V_{TR}	869.037
Factor de espacio para la tensión de paso	K_{s}	0.317
Longitud de conductor efectivamente enterrada utilizada en la tensión de paso	L_{s}	501.122
$V_{\text{Paso de malla}}$	V_{PR}	540.030
Coefficiente de forma 1	k_1	1.331
Coefficiente de forma 2	k_2	5.476
Resistencia de la malla para la SE	R_{malla}	0.446
Número de varillas	n_{v}	12
Resistencia de las varillas para la SE	R_{j}	0.146
Resistencia mutua malla - varillas para la SE	R_{m}	0.407
Resistencia Total a tierra para la SE	R_{g}	0.453

Conforme a los resultados obtenidos en la tabla anterior, se determina la resistencia total para la subestación $R_g = 0,453\Omega$ utilizando las expresiones de SCHWARZ. Este valor obtenido es menor a la resistencia requerida $R_o = 1\Omega$ y no ha variado significativamente del valor inicial $R_g = 0,457\Omega$ a pesar de utilizar un conductor calibre N° 2/0 AWG.

Se determina el potencial máximo de dispersión el cual disminuye un 0,9 %:

Tabla 5.14 Valor del potencial máximo de dispersión recomendado

Potencial máximo de dispersión	V_{MD}	4531,081
--------------------------------	----------	----------

Este valor V_{MD} es mayor a la V_{TT} , pero puede aceptarse debido a que no supera los 5000 V que es lo recomendable de acuerdo con prácticas internacionales. La reducción significativa está en el valor de la tensión de toque de la malla que se ha reducido en un 7,5 %.

Este nuevo diseño presenta un pequeño sobredimensionamiento; sin embargo, dado que el objetivo principal es proporcionar ante todo seguridad humana y que la puesta a tierra este operativa durante muchos años, el costo queda relegado a un segundo plano.

Tabla 5.15 Parámetros definitivos recomendados

DESCRIPCIÓN	SUBESTACIÓN
Área de la Malla	1400 m ²
Largo de Malla	40 m
Ancho de Malla	35 m
Espaciamiento lado mayor	5 m
Espaciamiento lado menor	5 m
Sección conductor de tierra	67,43 mm ²
Número de varillas	12
Resistencia Total	0,453 Ω

5.4.-Valores de resistencia de puesta a tierra recomendables.

TABLA 5.16 Rango de variación de resistencias.

Subestaciones	Resistencia (Ω)
Subestaciones pequeñas	$R < 5$
Subestaciones grandes	$R < 1$

Referencia /5/

5.4.1. Evaluación de resistencia de puesta a tierra

Un buen diseño de puesta tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de toque y paso; sin embargo la limitación de las tensiones transferidas principalmente en subestaciones de media y alta tensión es igualmente importante. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse los siguientes valores máximos de resistencia de puesta tierra adoptados de la recomendación técnica IEEE Std. N° 80.

TABLA 5.17 Valores máximos posibles

Subestación	Resistencia de Puesta tierra(Ω)
Subestación de extra alta tensión	1
Subestación de distribución	1 – 5

Referencia /12/

5.4.2.-En Instalaciones entre 22,9 kV hasta 220 kV

Los sistemas de tensión alterna recomendados deberán considerar lo siguiente, si es un sistema de 22,9 kV de tres o cuatro conductores, el neutro puede estar puesto a tierra; 22,9 / 13,2 kV puesto a tierra de manera efectiva, así como para los sistemas de 60 kV , 138 kV y 220 kV de tres hilos, con el neutro puesto a tierra de manera efectiva. Referencia /7/

5.4.3.- En instalaciones de electrificación rural

Según las Normas de Electrificación Rural, consideran el uso de una sola puesta a tierra en la subestación de distribución sustentado en la norma ANSI C57.12.20 – 1974.

Las normas de electrificación rural en el PERÚ (MEM / DGE) consideran como máximo los siguientes valores de la resistencia de puesta tierra de las subestaciones de distribución:

- En subestaciones trifásicas y monofásicas conectadas entre fases (bifásicas): 25Ω .
- En transformadores monofásicos de sistemas con retorno total por tierra, los siguientes valores de acuerdo a la potencia de los transformadores:

TABLA 5.18 Resistencias en instalaciones rurales.

Potencia del Transformador Kva.	Resistencia de Puesta Tierra (Ω)
5	25
10	25
15	20
25	15

Los límites de las resistencias de puesta tierra en subestaciones MRT para tensiones 13,2 kV se dan a continuación en forma aplicativa:

TABLA 5.19 Resistencias en instalaciones MRT

Potencia del transformador (Kva.)	kV monofásico	Resistencia de puesta a tierra MEM/DEP (Ω)
3	13,2	25
5	13,2	25
10	13,2	25
15	13,2	20
25	13,2	15
40	13,2	--

Referencia /11/

TABLA 5.20 Resistencias en diferentes casos

Tableros de baja tensión	Resistencia (Ω)
Neutros	5 – 10
Masas	10 – 15
Subestaciones de transformación de alta/baja tensión	Resistencia (Ω)
Transformadores lado de alta	10 – 20
Neutros	5 – 10
Cables de guarda y masas de alta	10 – 20
Patios de transformación de extra alta tensión	Resistencia (Ω)
Malla integral del patio	2 – 5
Hidroeléctricas con patio de transformación	Resistencia (Ω)
Malla integral del conjunto	2 – 5

Referencia /2/, /9/

5.5. - Resistencia de PAT en instalaciones de A.T. en el límite $1\text{kV} \leq V \leq 36\text{kV}$.

La resistencia máxima admisible del sistema de puesta tierra de la subestación, debe ser determinada por la máxima corriente de falla a tierra que el electrodo pueda inyectar a tierra, o por la máxima corriente de falla de la subestación, debiendo la resistencia del sistema de puesta a tierra ser tal que, bajo cualquier condición del suelo, con la máxima corriente el potencial de tierra de todas las partes de la malla de tierra no supere los 5kV, en tanto que en circunstancias especiales, cuando no se pueda razonablemente obtener este límite, se permite una tensión mayor, hasta el máximo nivel de aislamiento del equipo de comunicaciones.

$(R_{\text{spat}}) \cdot (I_f) \leq 5\text{kV}$, sea S_{cc} proporcionada por empresa eléctrica I_f en R. Transitorio.

Además, las tensiones de toque y de paso en los límites, dentro y alrededor de la puesta a tierra de la subestación, incluyendo las áreas en las que se apoyan las estructuras metálicas conectadas eléctricamente a la subestación, no deben exceder los valores especificados en la Tabla 5.21.

TABLA 5.21 Datos de diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Resistividad $\Omega - m$	Duración de falla 0,5 segundos		Duración de falla 1,0 segundos	
		Tensión de paso V	Tensión de toque V	Tensión de paso V	Tensión de toque V
Orgánico Mojado	10	174	166	123	118
Húmedo	100	263	188	186	133
Seco	1000	1 154	405	816	286
Piedra partida 105 mm	3000	3 143	885	2216	626
Cama de roca	10 000	10 065	2 569	7 116	1 816

Nota 1: Tabla calculada de acuerdo al IEEE Standard N° 80.

Nota 2: La instalación de una subestación típica se diseña para una duración de falla de 0.5 segundos y el total de la superficie dentro del cerco es cubierto con una capa de piedra partida de 150 mm de espesor con una resistividad de 3000 $\Omega - m$.

Nota 3: Se debe tener en cuenta el cumplimiento de la Norma IEC 60479.

Culminada la construcción, se debe medir la resistencia de la puesta a tierra de la subestación y, si es necesario, se deben hacer los cambios que aseguren que no se exceda el máximo permisible de la resistencia de puesta a tierra. Referencia /10/.

CAPITULO VI

PUESTAS A TIERRA EN LINEA DE TRANSMISIÓN

6.1.- Cálculo de la resistencia de contrapeso aproximado

Los procedimientos para diseñar Sistemas de Puesta a Tierra (SPAT) se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

En líneas de transmisión esta difundida la resistencia de puestas a tierra tipo contrapeso, debido a las características geográficas del terreno y el clima en las diferentes regiones del Perú, también para proteger contra hurtos, las puestas a tierra en líneas de transmisión se realizaran de acuerdo la resistividad del suelo y la resistencia deseada, se puede determinar aproximadamente la longitud requerida de contrapeso, utilizando la figura 6.1 dada a continuación:

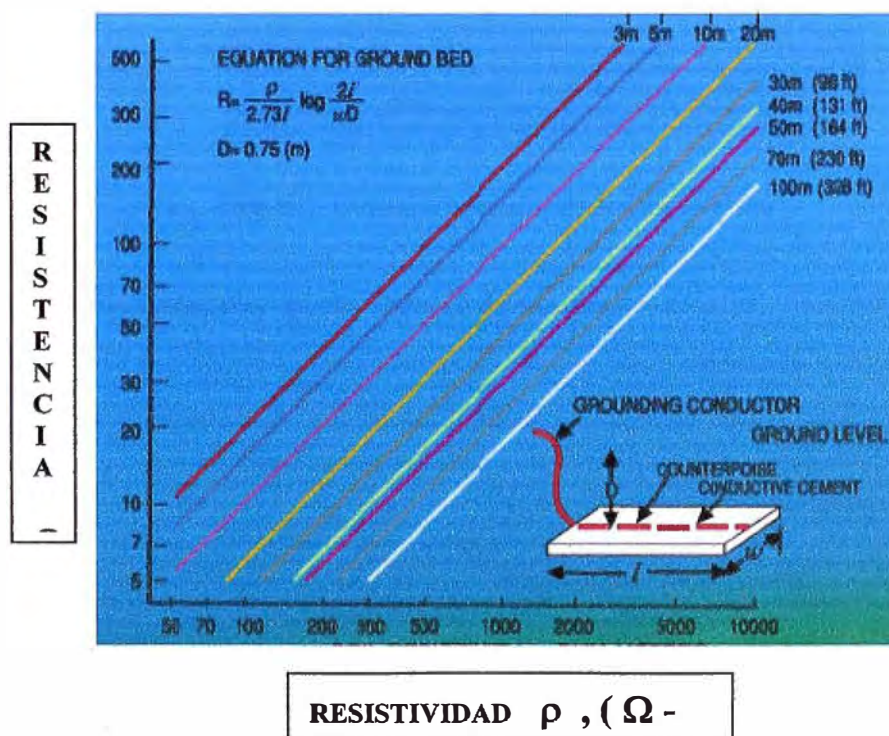


Fig. 6.1 Valores de la resistencias para diferentes longitudes de contrapeso

6.2.- Características del cemento conductivo

En las técnicas modernas de aterramiento se utiliza el cemento conductivo GEO-GEM que tiene las siguientes características:

- Polvo fino, empacado en bolsas de 11 Kg.
- Fácil instalación
- No requiere mantenimiento
- Ecológico
- Reduce la impedancia a las sobre tensiones
- Previene el hurto de conductores



Fig. 6.2 Cemento conductivo GEO-GEM

6.3.- Fórmula para calcular la resistencia de contrapeso

La resistencia de contrapeso se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2.73l} \log \frac{2l^2}{wD} \quad (6.1)$$

R = Resistencia de puestas a tierra

ρ = Resistividad en Ohm – m

l = Longitud de metros

W = Ancho en metros

D = Profundidad en metros

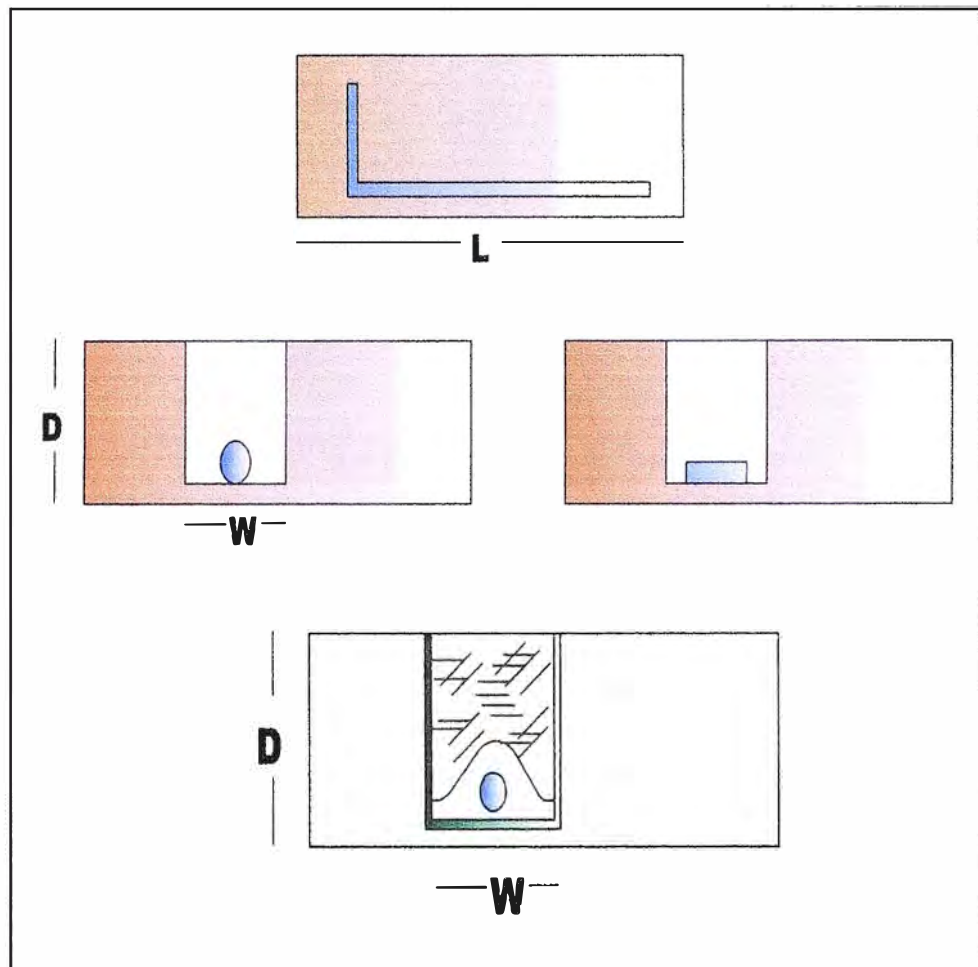


Fig. 6.3. Vistas del contrapeso

6.4.- Procedimiento para realizar las puestas a tierra con contrapeso y cemento conductivo

6.4.1.- Primer paso

Excavar una zanja de 40 a 50 cm. de ancho y de 50 a 70 cm. de profundidad y tan larga como se requiera. Coloque el conductor desnudo a lo largo de la zanja, donde sube a la superficie deberá aislarse para prevenir la corrosión.



Fig. 6.4. Ubicación del cable con la zanja

Nota: En lugar del cable se puede usar una pletina

6.4.2.- Segundo paso

Rellene la zanja con la cantidad necesaria de cemento conductivo, descargando la bolsa de GEO-GEM a lo largo de la zanja. Aproximadamente una bolsa de 11 kg por cada dos metros lineales.



Fig. 6.5. Protegiendo el cable con cemento conductivo

6.4.3.- Tercer paso

Compacte ligeramente con los pies, empujando el cemento conductivo GEOGEM hacia el centro cubriendo completamente el cable desnudo cuidando que no quede descubierto.

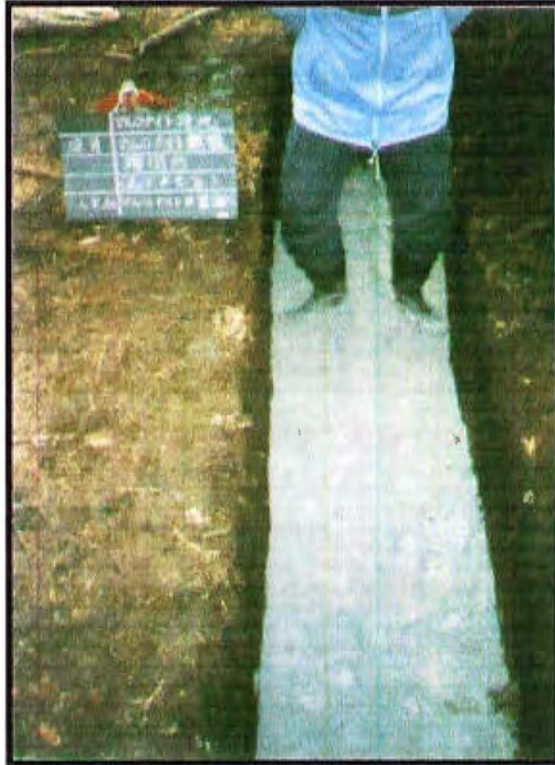


Fig. 6.6 Compactación del cemento conductivo

6.4.4.- Cuarto paso

El conductor desnudo quedará cubierto completamente por el cemento conductivo GEOGEM y la instalación esta terminada.



Fig. 6.7. Compactado final del cemento conductivo

6.4.5.- Proteger con una pequeña capa de tierra

Cubrir el cemento conductivo GEO-GEM cuidadosamente por una pequeña capa de tierra de cultivo libre de piedras e impurezas y rellenar el resto con tierra libre de piedras e impurezas.



Fig. 6.8 Cubriendo el cemento conductivo con tierra cernida

CONCLUSIONES

1. Para garantizar una adecuada calidad de puestas a tierras de protección en los sistemas de eléctricos, es importante tener en cuenta las Normas Internacionales y el Código Nacional de Electricidad.
2. El análisis del comportamiento de los valores de la puesta a tierra en un sistema eléctrico confirma la dependencia que tiene su magnitud en función de la resistividad del terreno donde será instalada.
3. La modificación de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión en subestación y distribución tiene un régimen de variación con los años de acuerdo a las características del terreno y el clima de la zona.
4. Si las puestas a tierra supera los valores establecidos por las Normas Internacionales y el Código Nacional de Electricidad no estaríamos cumpliendo el propósito para el cual fue diseñado.
5. Las puestas a tierra necesitan un mantenimiento periódico para mantener su valor en un rango aceptable de variación, porque con los años tiende a aumentar su valor.
6. Las puestas a tierra se podrían hacer de cualquier otra manera de las formas ya conocidas pero siempre en cuanto se garanticen el rango de variación y la aplicación de una ingeniería acorde con la tecnología moderna.
7. Los materiales utilizados en las puesta a tierra debe de ser utilizando bentonita y sales para disminuir la corrosión y no depredar los bosques utilizando tierra vegetal.

ANEXOS

ANEXO A

ESQUEMAS PAT EN B.T. / M.T.

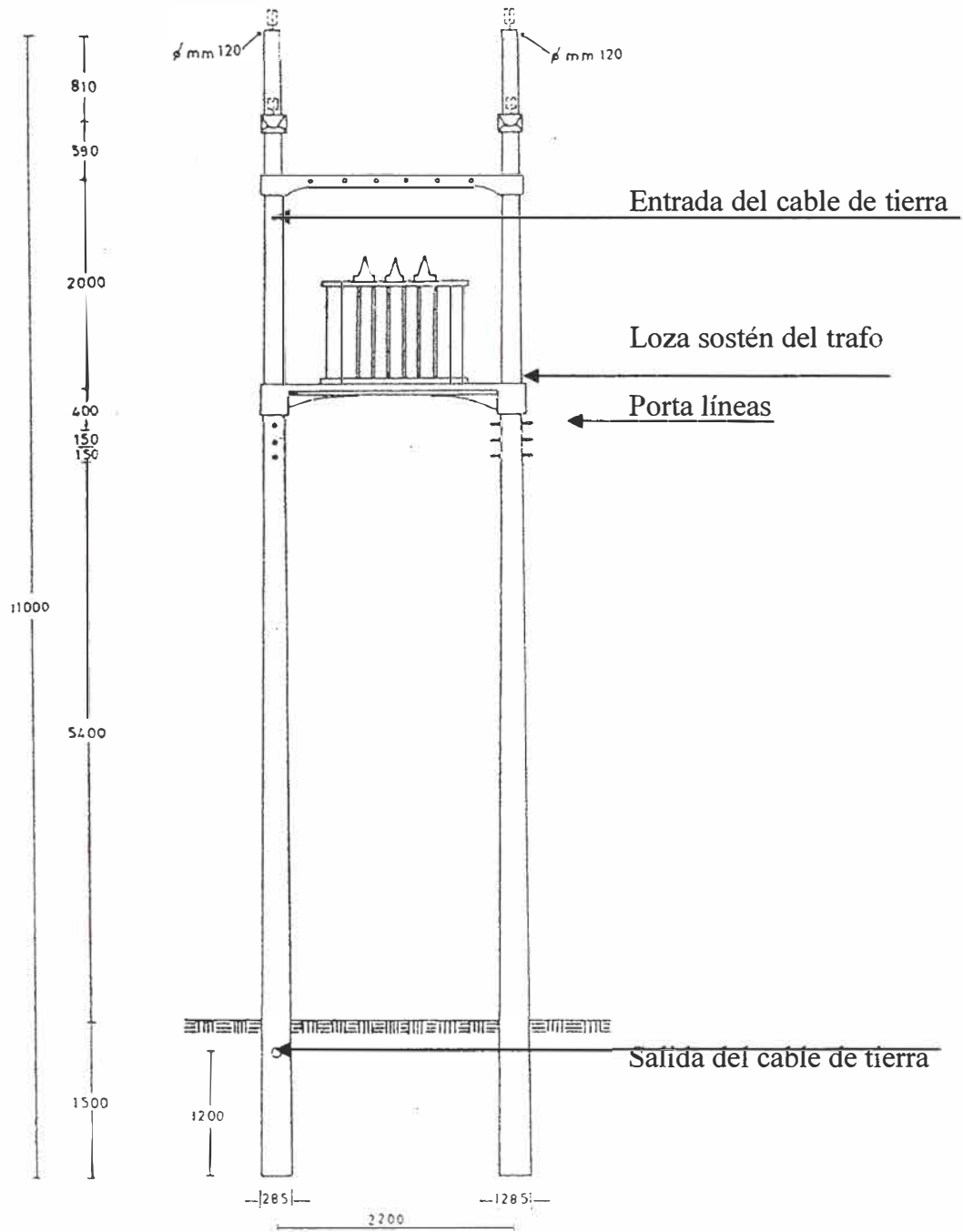


Fig. 1.-Subestación aérea biposte / ECA 11m / vista frente

ANEXO B
SUBESTACIÓN AÉREA MONOPOSTE

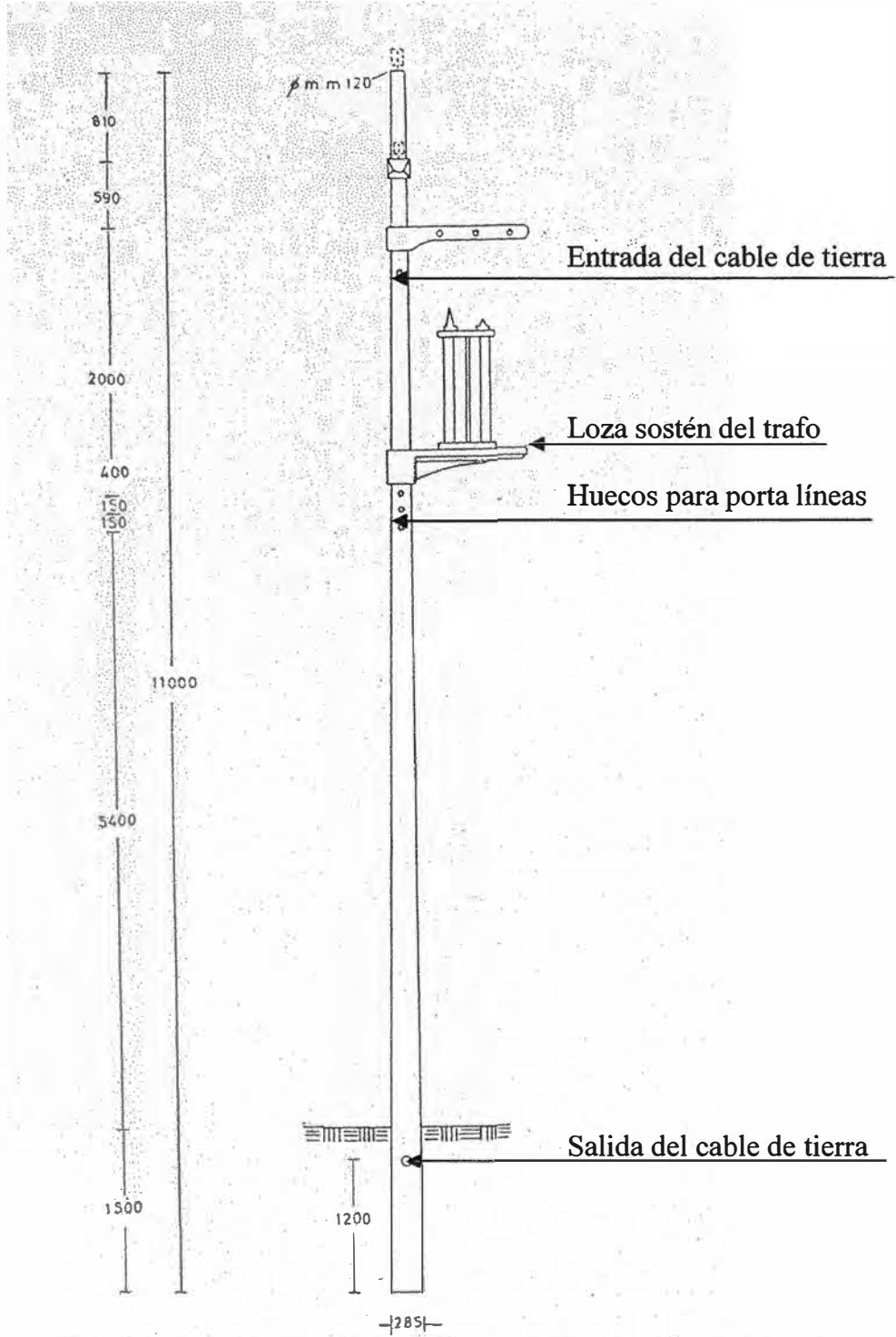


Fig. B.1.-Subestación aérea monoposte / ECA 11m / vista perfil

ANEXO C
SUBESTACIÓN AÉREA BIPOSTE

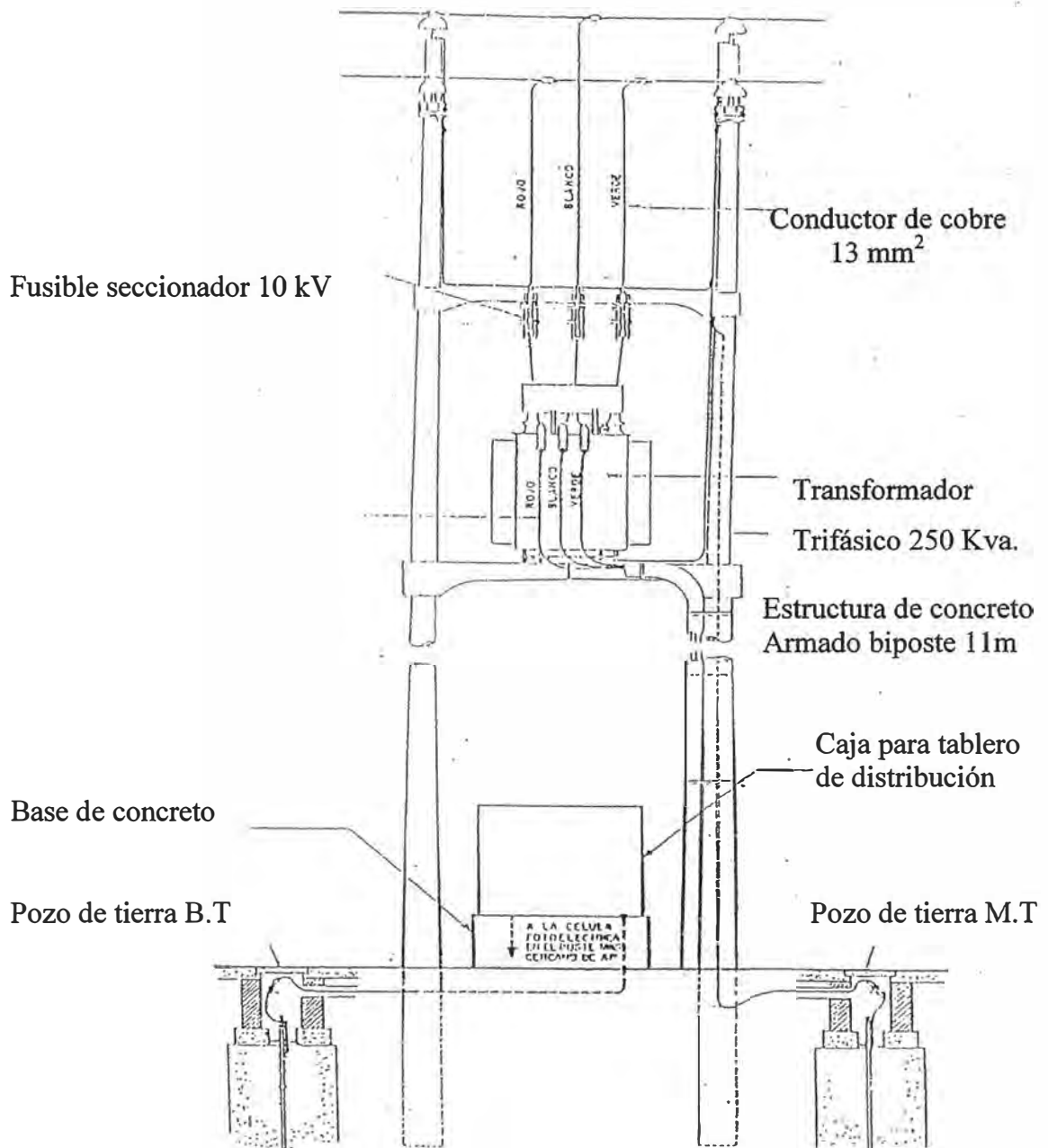


Fig. C.1.-Subestación aérea biposte con alimentación aérea de 250 Kva. / Disposición

ANEXO D
ESTRUCTURA DE MADERA

ANEXO E
ESTRUCTURA DE CELOSÍA

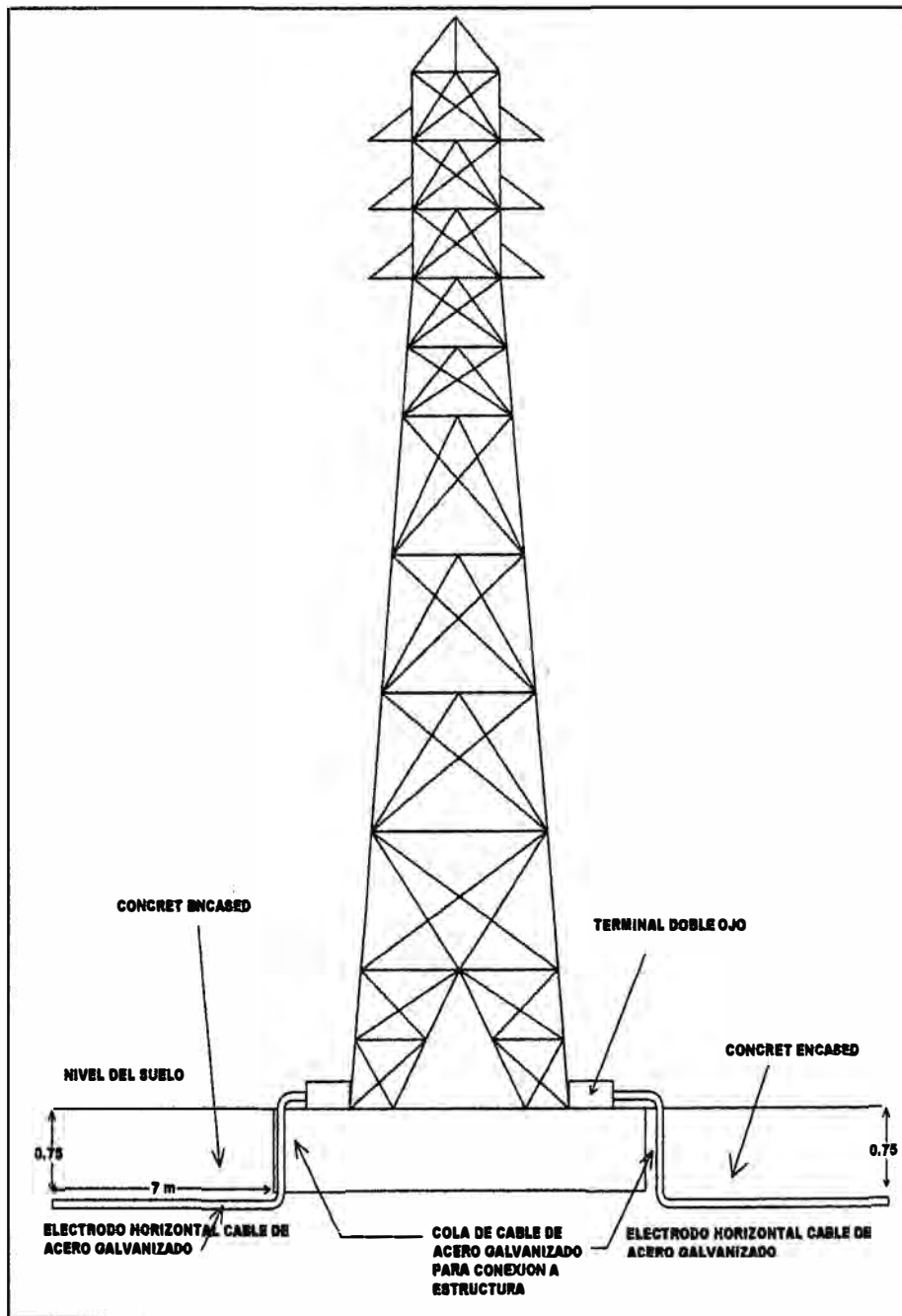


Fig. E.1. Estructura de Celosía con Puestas a tierra de contrapeso

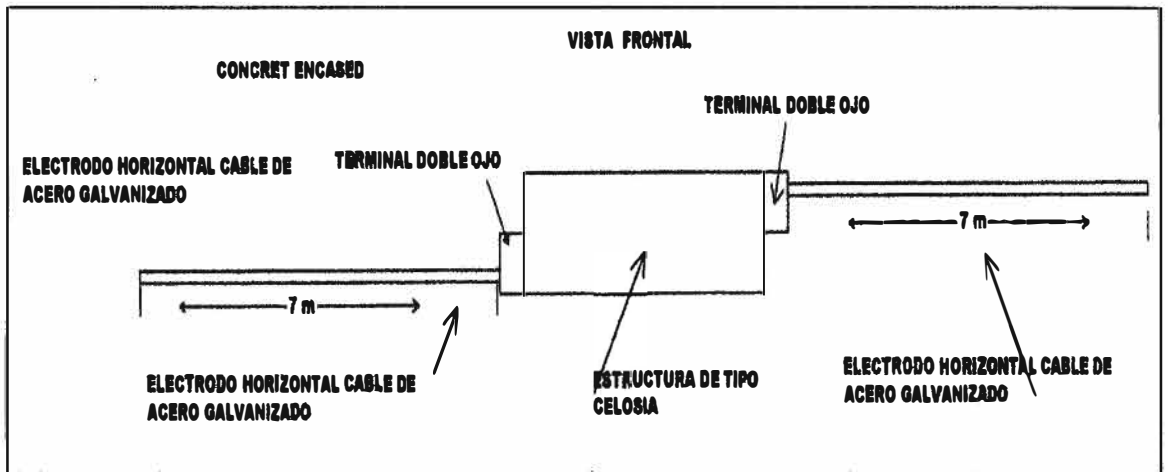


Fig. E.2.

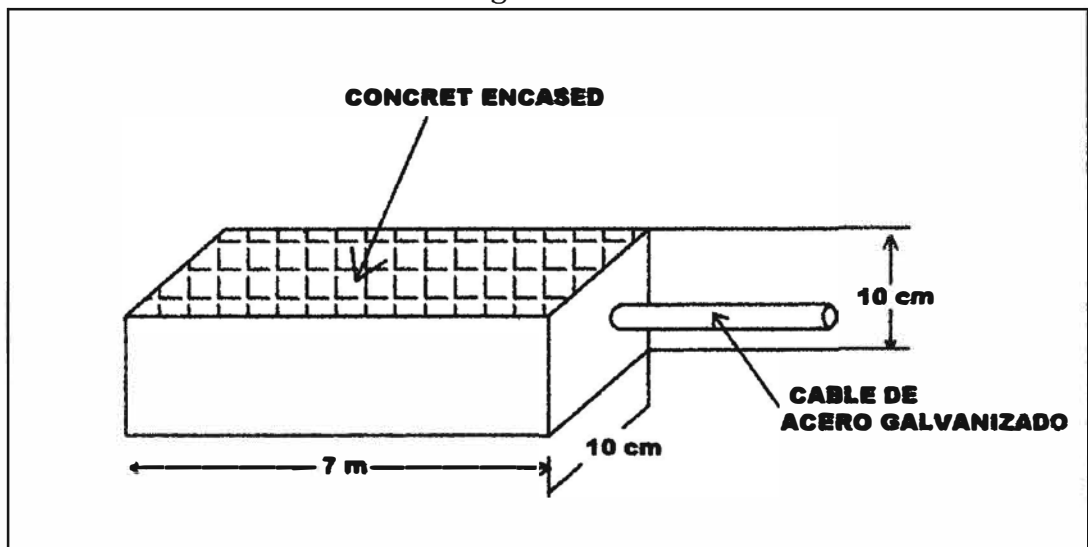
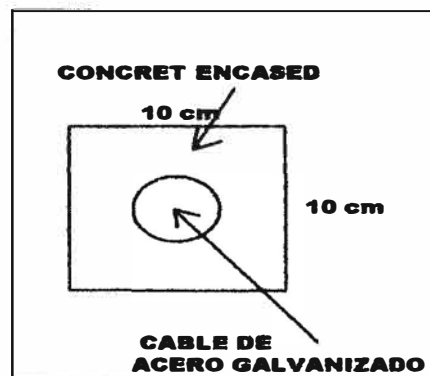


Fig. E.3.



Figuras; E.2 / E.3/ E.4. Vistas de electrodo embebido en concreto

Nota: El cable de acero galvanizado debe de ser recubierto por una capa delgada resis a la corrosión (zinc o cadmio)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ Miguel de la Vega Ortega, “Problemas de Ingeniería de Puesta A Tierra”, 2001.
- /2/ Ph.D. Dinkar Mukhedkar, “Técnicas de Puesta a Tierra en Sistemas de Potencia”.
- /3/ Colegio De Ingenieros Del Perú, “Seminario Sistemas de Puesta a Tierra Industriales y de Usuarios Finales”, Lima, 2002.
- /4/ Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, “Manual de Ingeniería Eléctrica”, Tomo III, Mc GRAW HILL, 1996.
- /5/ M.Sc. Justo Yanque Montufar, “Curso Alta Tensión y Técnicas de Prueba”, Sección de Postgrado FIEE, 2002.
- /6/ Comisión Electrotécnica Internacional, “Norma IEC 60479”.
- /7/ “Código Nacional de Electricidad Suministro”, 2001.
- /8/ Institute of Electrical and Electronics Engineers, “Guide For Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, And Earth Surface Potentials Of A Ground System”, Std 81, 1983.
- /9/ EDEGEL SAA., Unidad de Equipos Eléctricos, “Instructivo de Mantenimiento en Centrales de Generación y Subestaciones”, 1999.
- /10/ “Código Nacional de Electricidad Utilización”, 2006.
- /11/Ministerio de Energía y Minas, DEP, “Conversatorio Técnico Sobre Sistemas de Puesta a Tierra y Protecciones Contra Descargas Atmosféricas”, Lima, 2004.
- /12/Institute of Electrical and Electronics Engineers, “Guide For Safety In AC Substation Grounding”, Std 80, 2000.

/13/M.Sc. Justo Yanque Montufar, “Sistema de conexión a tierra”, Manual para electricistas, PROCOBRE - PERÚ, 2000.

/14/Gilberto Enríquez Harper, “Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas”, Editorial LIMUSA, 2002.

/15/ CCIESAM, Sociedad Nacional de Ingenieros, “Seminario de puestas a tierra”
Lima 2007