

S I S T E M A S D E C O N E X I O N A T I E R R A

P A R A L I N E A S A E R E A S Y C A B L E S

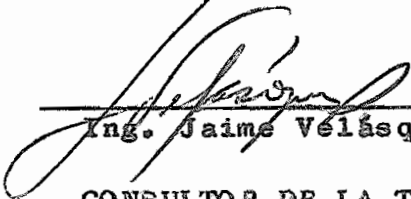
Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, de la Escuela Politécnica Nacional.

LUIS CAMILO VINTIMILLA CALLE

Quito

Agosto de 1.971

Certifico que este trabajo ha
sido realizado en su totalidad
por el Sr. Luis Camilo Vintimil
la Calle.


Ing. Jaime Velásquez
CONSULTOR DE LA TESIS

Quito, Agosto de 1.971

I N D I C E G E N E R A L

M A T E R I A	PAG.
CAPITULO I: FUNDAMENTOS Y GENERALIDADES	1
I.1.- Objetivos de las Instalaciones	2
I.2.- Explicación de la Terminología utilizada	3
I.3.- Influencia de la resistencia del cuerpo humano en el diseño	5
CAPITULO II: ELECTRODOS DE CONEXION A TIERRA	15
II.1.- Análisis del Campo Eléctrico ocasionado alrededor de los Electrodo	16
II.2.- Tipos de Electrodo	19
II.2.1.- Electrodo Simples	19
II.2.1.a.- Electrodo Semiesférico	19
II.2.1.b.- Electrodo Tubular	27
II.2.1.c.- Electrodo Horizontal en forma de cinta o cable	31
II.2.1.d.- Electrodo Anular	34
II.2.2.- Electrodo Combinados	46
II.2.2.a.- Electrodo Tubulares Paralelos	46
II.2.2.b.- Electrodo para Control Del <u>Po</u> tencial	54
II.2.3.- Hilo de Guarda	87

CAPITULO III: ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS
ELÉCTRICAS DEL SUELO 95

- III.1.- Características eléctricas del suelo 96
- III.2.- Determinación de la Resistencia Bepé-
cífica del suelo 96
- III.3.- Influencia de la Humedad y la Tempe-
ratura 104
- III.4.- Valores Típicos de Resistencias Bepé-
cíficas para varios tipos de suelo 107
- III.5.- Medición de la Resistencia de Difu-
sión de los Electrodoos 109

CAPITULO IV: POSIBILIDADES DE CONEXION DEL
PUNTO NEUTRO 114

- IV.1.- Estudio General 115
 - IV.1.1.- Líneas con alta resistencia
de conexión a tierra 116
 - IV.1.1.a.- Líneas con neutro aislado 116
 - IV.1.1.b.- Líneas con neutro a tierra
con bobinas de inductancia 121
 - IV.1.2.- Líneas con baja resistencia
de conexión a tierra 126
 - IV.1.2.a.- Líneas con neutro directa-
mente puesto a tierra 126
 - IV.1.2.b.- Líneas con neutro a tierra
mediante resistencias 129

IV.2.- Estudio Generalizado de fallas a tierra para todos los tipos de redes	132
IV.3.- Comparación de los efectos de las corrientes de falla a tierra para los diferentes tipos de redes	158

CAPITULO V: DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE CONEXION A TIERRA PARA LINEAS AEREAAS

V.1.- Líneas con alta resistencia de conexión a tierra	170
V.1.1.- Potenciales permitidos de los electrodos	170
V.1.2.- Influencia del Hilo de Guarda	172
V.1.3.- Incidencia de las Descargas Atmosféricas	177
V.2.- Líneas con baja conexión a tierra	199
V.2.1.- Tensiones permisibles de Paso y de Contacto	199
V.2.2.- Clasificación de las Torres en el diseño	200
V.3.- Diseño de las Instalaciones de Conexión a Tierra para Protección	205
V.3.1.- Consideración del tipo de Torres o Postes	206
V.3.2.- Materiales utilizados para los electrodos	209
V.3.3.- Consideración del secamiento del suelo debido a cargas prolongadas	213

V.3.4.- Normas Prácticas para la Ejecución de los Electrodo	215
V.3.5.- Líneas de Tierra	218
V.3.6.- Resumen de datos necesarios para el diseño	219
CAPITULO VI: DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE CO - NEXION A TIERRA PARA REDES DE CABLES	222
VI.1.- Factores de Reducción para Cables	223
VI.2.- Cables con cubiertas exteriores conductoras	226
VI.3.- Medición del Potencial de los Electrodo	
sus Resistencias de Difusión	229
VI.4.- Medición de las Tensiones de Paso	233
VI.5.- Diseño de las Instalaciones	233
VI.6.- Influencia de los Cables de Alta Tensión <u>so</u> bre los de Señalización	244
BIBLIOGRAFIA	247

CAPITULO PRIMERO

FUNDAMENTOS Y GENERALIDADES

I.1.- OBJETIVOS DE LAS INSTALACIONES:

Considerando primordialmente la seguridad personal, las diferentes normas relacionadas con instalaciones eléctricas, exigen protección de la vida humana así como de las partes de una instalación, en la generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica.

La protección de las instalaciones de alta tensión contra fallas que producen corrientes capaces de circular por las partes accesorias de una instalación (torres de transmisión, partes metálicas de un edificio, etc.), así como la protección contra descargas atmosféricas, han sido mejoradas en los últimos años, mediante la técnica de conexión a tierra, gracias a la cual los accidentes que anteriormente eran muy frecuentes debido a dichas fallas, han sido reducidos - prácticamente a cero, mientras que en las instalaciones de baja tensión, en las que no se pone especial interés a la conexión a tierra, los accidentes son mayores.

Las instalaciones eléctricas, que en caso de falla pueden ser peligrosas para las personas que se encuentran en sus inmediaciones, deben tener dispositivos que reduzcan al máximo este peligro. Cabe anotar que con estas instalaciones se está preservando la vida del personal de servicio y por lo tanto vale la pena hacer cualquier inversión, que por otro lado en la generalidad de los casos es menor que la que se realiza en dispositivos para protección de aparatos.

Hablando específicamente de la técnica de conexión a

tierra del punto neutro en líneas de transmisión (líneas aéreas o cables) la práctica es en general muy variada. Cada punto se tratará en detalle posteriormente.

Las instalaciones de conexión a tierra, pueden ser utilizadas para varios fines, como se detalla a continuación:

I.1.1.- Conexión a tierra para protección:

Es aquella en la que una parte conductora del elemento de servicio o instalación no perteneciente al circuito de corriente, se conecta a tierra a fin de proteger a las personas contra tensiones de contacto o de paso demasiado altas.

I.1.2.- Conexión a tierra para servicio:

Es la conexión a tierra de una parte de la instalación perteneciente al circuito de servicio (por ejemplo: el punto neutro de un transformador) en cualquier lugar de una red.

I.1.3.- CONEXION a tierra contra descargas atmosféricas:

De iguales características que la conexión a tierra para protección, en cuanto a las partes que se han de poner a tierra, - pero sirve para proteger la instalación así como las personas que están en sus inmediaciones contra el efecto de las descargas atmosféricas.

I.2.-EXPLICACION GENERAL DE CONCEPTOS:

I.2.1.- Electrodos de tierra:

Son conductores introducidos en el suelo y que forman con éste una unión conductora de corriente. Las formas comunes de electrodos son: electrodos -

de cinta, barra, placas, tuberías de agua, o combinaciones - de éstas.

I.2.2.- Electrodo de tierra de control:

Son los que se utilizan para controlar el potencial en una instalación de puesta a tierra.

I.2.3.- Línea de tierra:

Es la línea que une la parte de la instalación eléctrica que ha de ponerse a tierra con el respectivo electrodo. La línea de tierra debe estar fuera del suelo o enterrada en él pero con aislamiento, para ser considerada como tal.

I.2.4.- Instalación de tierra:

Está compuesta de la totalidad de los electrodos de tierra, unidos entre sí conductivamente inclusive con sus líneas de tierra.

I.2.5.- Tierra de referencia:

Es una región del suelo muy apartada de los correspondientes electrodos en la cual no se presentan tensiones apreciables entre puntos cualesquiera de la misma.

I.2.6.- Resistencia específica del suelo:

Es la resistencia eléctrica del mismo. La unidad práctica es el ohmio-metro que equivale a la resistencia entre dos caras opuestas de un cubo de tierra de un metro de arista.

I.2.7.- Resistencia de difusión:

De un electrodo o de una instalación de tierra es la resistencia del suelo entre el electrodo o la instalación de tierra y la tierra de referencia.

I.2.8.- Resistencia de puesta a tierra:

Es la suma de la resistencia de difusión del electrodo y la resistencia de la línea de tierra.

I.2.9.- Potencial del electrodo:

La tensión que tiene el electrodo de puesta a tierra con respecto a un punto suficientemente alejado (tierra de referencia) se conoce con el nombre de potencial del electrodo.

I.3.- INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO:

El potencial de la superficie del suelo crece desde cero en la tierra de referencia, hasta llegar al valor máximo que es el potencial del electrodo, según se puede apreciar en la Figura 1.1.

En caso de que una persona tenga en contacto cualquier parte de su cuerpo con la zona que se encuentra bajo el potencial ocasionado por el electrodo o con una parte de la instalación puesta a tierra, estará sometido a una parte solamente del potencial del electrodo. Puede tratarse de un contacto entre sus dos manos o entre sus manos y sus pies, - en cuyo caso se habla de una "Tensión De Contacto" o entre sus dos pies, en cuyo caso se habla de una "Tensión de Paso"

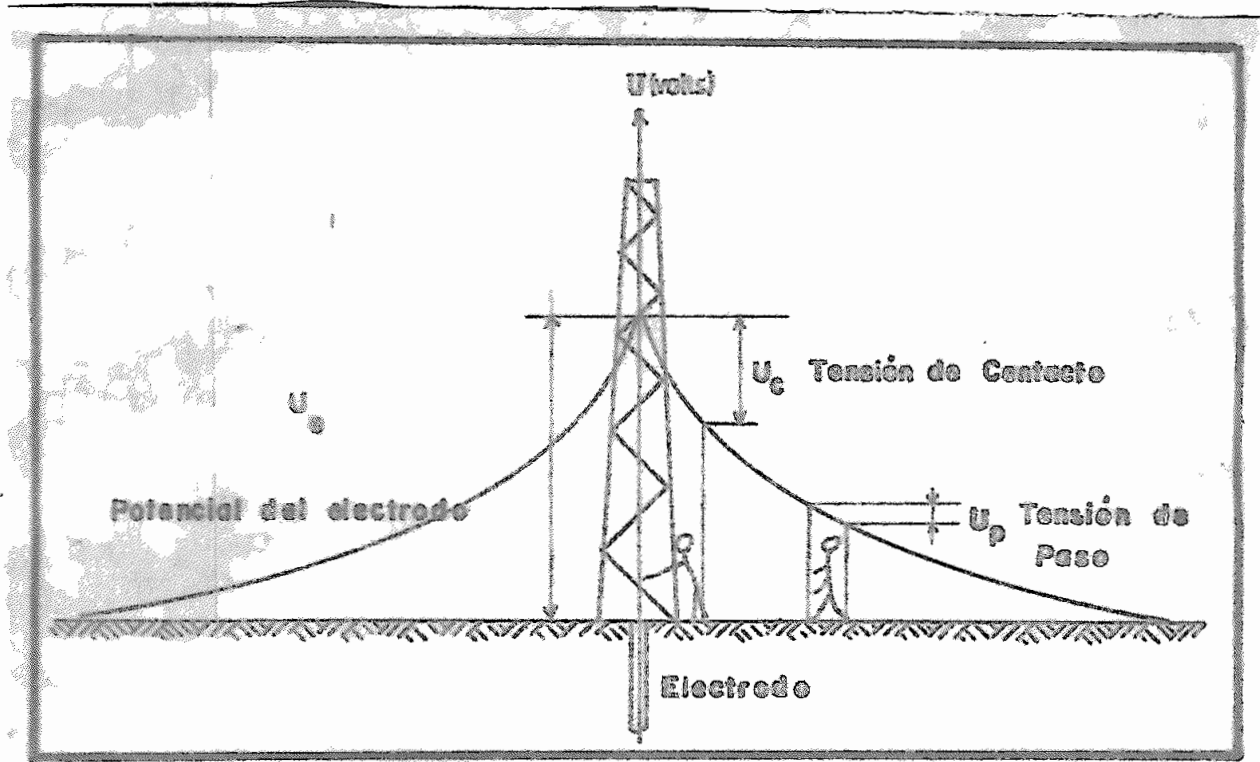


Fig. 1.1.- Distribución del potencial en el suelo, alrededor de un electrodo de puesta a tierra.

La magnitud de estas tensiones, dependen además del potencial del suelo y las partes de la instalación, también de la resistencia del cuerpo humano (R_p) que varía según las circunstancias, como se verá más adelante.

1.3.1.- Tensión de paso:

Como se observa en la Fig. 1.2 se una persona se encuentra parada en un terreno sometido al campo eléctrico de un electrodo, está puentando con su cuerpo una

determinada porción de tensión (U_p), la cual está determinada por la longitud de un paso (aproximadamente un metro).

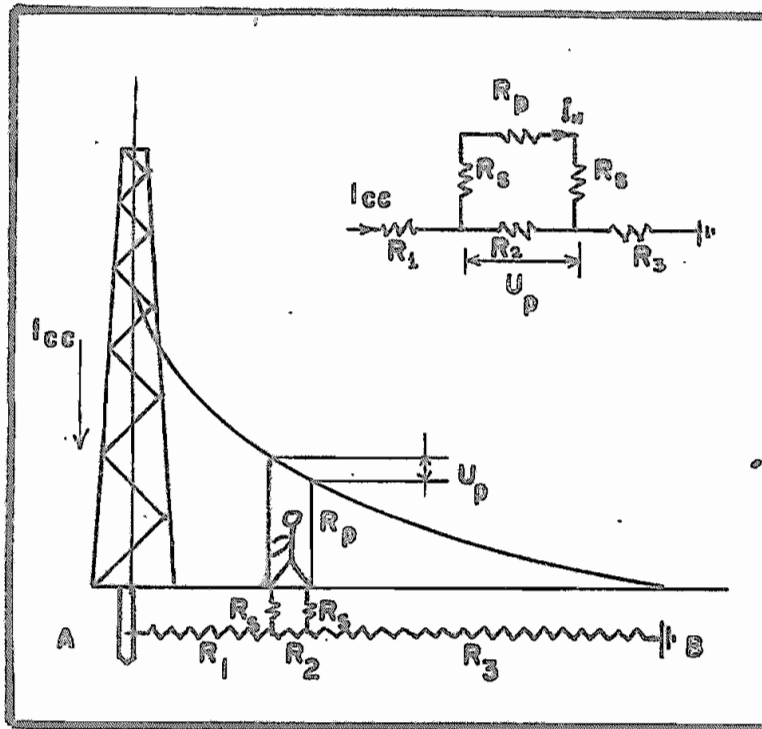


Fig. 1.2.- Tensión de Paso y circuito equivalente.

Al realizarse el puente a través de los pies de la persona, la resistencia de difusión (R_D) comprendida entre los puntos A y B se subdivide en las porciones R_1 , R_2 y R_3 , hay además que considerar la resistencia del suelo directamente-bajo las plantas de los zapatos (R_S) la resistencia de las plantas de los zapatos y la resistencia del cuerpo humano - (R_p), de tal forma que el circuito equivalente será el indicado en la Fig, 1.2, siendo I_k la corriente que circula a través de la persona.

1.3.2.- Tensión de Contacto:

En el caso de que la persona haga un contacto entre una estructura puesta a tierra, por medio de su o sus manos y el suelo por medio de sus piés, se tiene la tensión de contacto, (U_c), como se puede observar en la Fig. 1.3.

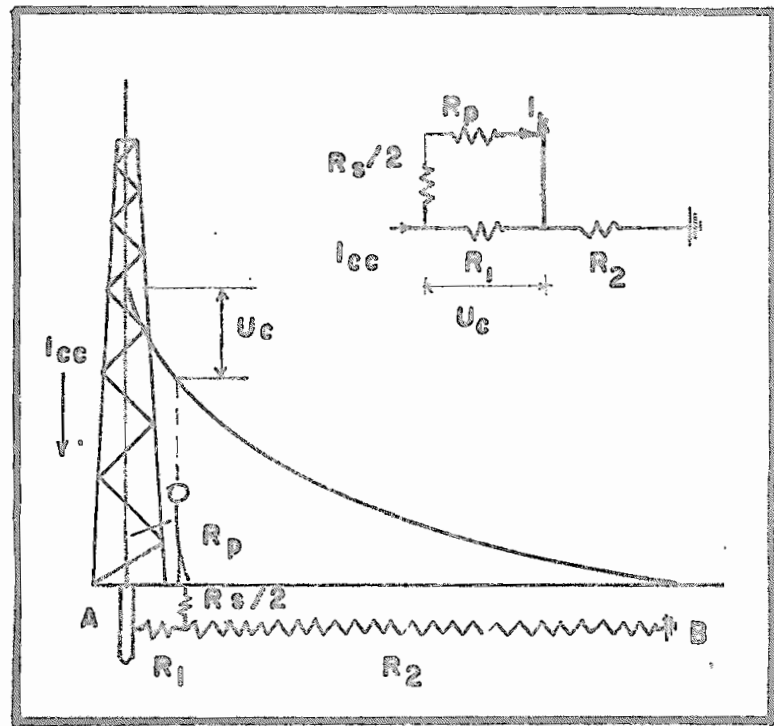


Fig. 1.3.- Tensión de Contacto y circuito equivalente.

La resistencia del contacto de la mano es muy baja y se asume igual a cero, lo mismo la resistencia de los zapatos.

Para propósitos prácticos se toma valores para R_s de $3\rho_s$, siendo ρ_s la resistividad del suelo en ohmios-metro.

I.3.3.- Tensiones Permisibles de Contacto y de Paso:

Por experiencia se conoce que la circulación de una corriente de 100 mA. por el cuerpo humano por el lapso de algunos segundos, es mortal. A continuación se dá una tabla que indica los efectos que producen los diferentes valores de corrientes al atravesar el cuerpo humano cuando se realiza el contacto entre las dos manos.

CORRIENTE

EFECTO QUE PRODUCE

1 - 2 mA	Ligero sacudimiento muscular.
2 - 4 mA	Sacudimiento nervioso en los dedos y en el antebrazo.
5 - 7 mA	Ligeras sensaciones de calambres.
10 - 15 mA	Calambres generales. Es aún posible safarse.
19 - 22 mA	No es posible soltarse. Doloroso.
25 - 35 mA	Dolores muy fuertes.
35 - 50 mA	Dolores insoportables.
50 - 100mA	Peligro mortal.

Naturalmente el valor de corriente que incumbe un peligro mortal, es también dependiente del tiempo de duración del contacto. El valor anteriormente dado de 100 mA. es de peligro mortal para una duración del contacto de tres segundos, si los tiempos son más cortos, los valores de corrientes serán correspondientes más altos, según la ecuación de Dalziel la corriente I_k a la cual corre peligro la persona viene dada por:

$$I_k = \frac{0.0165}{\sqrt{t}} \text{ amperios}$$

siendo t el tiempo de duración del contacto en segundos,

O sea para diferentes tiempos de contacto se tiene:

TIEMPO	CORRIENTE DE EFECTOS PELIGROSOS MAYOR A:
3. seg.	95 mA
2 "	120 "
1 "	165 "
0,6"	215 "
0,3"	300 "
0,2"	370 "
0,1"	520 "

Es útil hacer mención de la forma en que se realiza el contacto, pues en el caso de que este sea entre las manos o entre piés y manos la corriente atraviesa el corazón y los pulmones en una proporción alta del total, mientras que si el contacto es entre los piés la corriente circula de un pié al otro principalmente por la parte inferior del cuerpo mientras que el tronco se ve poco afectado y por lo tanto también los órganos vitales (corazón, pulmones) en él alojados. Se ha determinado que este último caso atraviesa el corazón sólo un 10% de la corriente que atravesaría en caso de contacto entre manos.

En el caso de contacto entre piés con una corriente permanente de hasta 25 mA, las rodillas y las partes superiores del cuerpo permanecen libres de cualquier sensación de electrificación.

Estos datos sirven para determinar la magnitud permisible de las tensiones de paso y de contacto en las instalaciones eléctricas, de tal forma que estas no sean peligrosas a la vida humana. Si se fija una corriente permisible de circulación por el cuerpo y conociendo la resistencia del mismo pueden determinarse los valores de tensión.

La resistencia total del cuerpo humano varía dentro de límites más o menos amplios. La piel es la parte que ofrece el porcentaje más alto en relación con las otras partes del cuerpo, pues la resistencia de la piel es dependiente a su vez del voltaje aplicado en la misma.

En la Fig. 1.4 se puede visualizar la variación de los valores de la resistencia del cuerpo humano al variar la tensión y para diferentes estados de las manos (seca, húmedas, húmedas con solución salina)

Como se observa en la Fig. 1.4, las variaciones de la resistencia del cuerpo humano tienen amplios límites de variación, teniendo en cuenta sobre todo que para valores de tensión de 100 a 200 V, el valor de la resistencia baja notablemente.

Para trabajar con un máximo de seguridad en el diseño, se podría adoptar un valor medio de la resistencia del cuerpo humano de 500 ohmios. Sin embargo si se adopta un valor de mil ohmios se tendrá ya suficiente seguridad y será en base a este valor que se hagan las siguientes consideraciones.

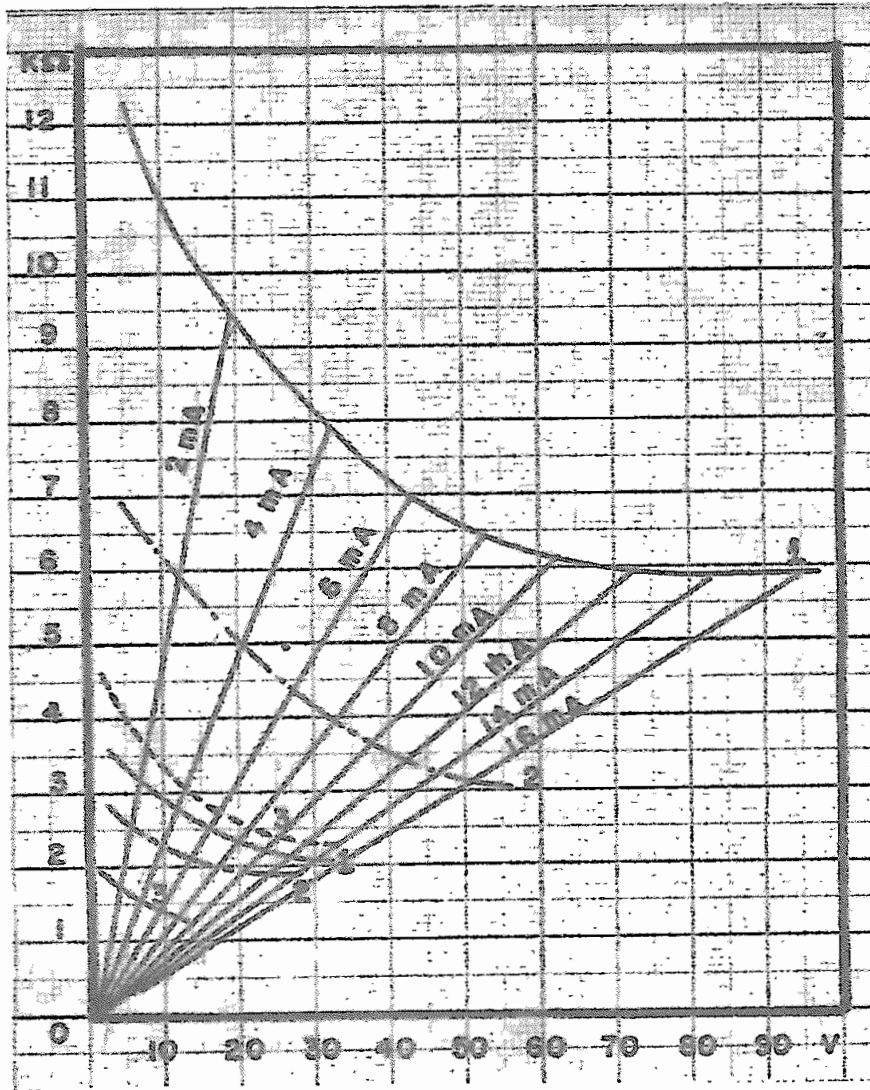


Fig. 1.4.- Valores de Resistencia del Cuerpo Humano, máximos y mínimos para:

Curvas 1: manos secas

Curvas 2: Manos húmedas

Curvas 3: manos húmedas con solución salinas.

Del circuito equivalente de la Fig. 1.2 se puede deducir el valor de la tensión de paso U_p .

$$U_p = I_k \cdot (R_p + 2R_s)$$

$$I_k = 0.165 / \sqrt{t}$$

$$R_p = 1.000 \text{ ohmios}$$

$$R_s = 3 \rho_s$$

$$U_p = (1.000 + 6 \rho_s) \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

$$U_p = \frac{0.165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Así mismo para el caso de la tensión de contacto:

$$U_c = I_k \cdot (R_p + R_s/2)$$

$$U_c = (1.000 + 1.5 \rho_s) \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

$$U_c = \frac{165 + 0.25 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Según las normas alemanas VDE, para redes con punto neutro aislado o puestas a tierra por medio de una bobina de inductancia, la tensión de contacto y de paso no debe sobrepasar un valor de 125 V. para sitios dentro de una instalación y 65 V. para sitios fuera de la misma.

Para líneas con neutro directamente conectado a tierra o conectado por medio de resistencias limitadoras de corrientes, los valores de tensión de contacto y de paso varían según cual sea el tiempo de desconexión del tramo de red fallado.

Para valores de tensión entre 100 y 200 V. se produce una disminución notable de la resistencia del cuerpo humano, - siendo esta una zona crítica, por lo tanto el valor de 125 voltios fijado como valor permisible de tensión de contacto está en esta zona crítica pero se considera que en la generalidad de los casos no se aplicará sobre una persona la totalidad de esa tensión, por lo que el peligro queda prácticamente anulado.

Por otro lado hay que considerar también la resistencia que ofrecen los zapatos y guantes.

Mientras los zapatos con planta de suela completamente secos ofrecen prácticamente un aislamiento perfecto, los húmedos a causa de lluvia, etc. pueden sufrir una disminución notabilísima de la resistencia, por lo tanto no hay que confiarse mucho en el aislamiento de estas prendas de vestir, - sino que para el diseño hay que considerar la situaciones - más perjudiciales, tomando como ya se dijo antes una resistencia promedio del cuerpo de un kilo ohmio.

Hay que poner especial énfasis en la importancia que tiene el despeje rápido de fallas, ya que éstas son más perjudiciales cuanto más prolongadas sean, en caso de que actúe sobre una persona.

C A P I T U L O S E G U N D O

E L E C T R O D O S D E C O N E X I O N A T I E R R A

II.1.- ANALISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO OCASIONADO ALREDEDOR DE LOS ELECTRODOS:

Los electrodos sirven para conducir la corriente eléctrica al suelo, estos forman parte de un circuito cerrado en el que la tierra se utiliza como elemento conductor. Si se introduce una corriente en el electrodo, esta se distribuirá simétricamente alrededor del mismo en el suelo.

Supóngase primero para facilidad, el caso de un electrodo semiesférico.

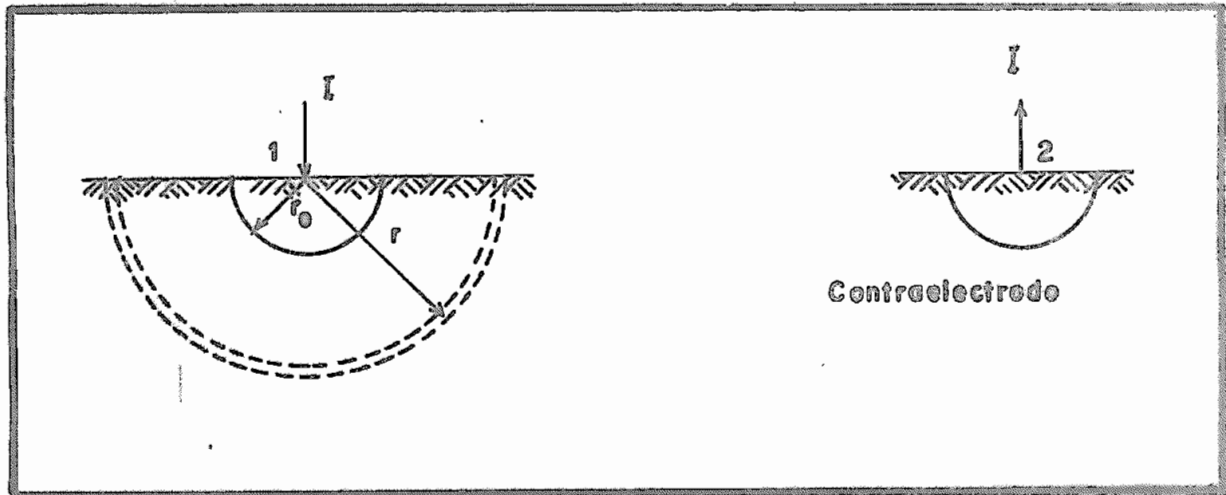


Fig. 2.1. Electrodo de conexión a tierra semiesférico.

Al entrar una corriente I en el electrodo, ésta una vez que ha recorrido el suelo la abandonará por un contraelectrodo generalmente distante del primero.

Alrededor de la semiesfera se forman capas de tierra equipotenciales semiesféricas y simétricas, cuya área aumenta progresivamente. Cuanto más alejada del electrodo está la capa equipotencial, más grande será el área de la misma y por lo tanto más pequeña la resistencia del suelo.

En caso de una falla a tierra circula a través de la resistencia del suelo la corriente de falla o una parte de esta originando una caída de potencial, especialmente alrededor de la instalación de puesta a tierra.

Los electrodos semiesféricos no son utilizados en la práctica, sin embargo el estudio del campo producido por éste, es de utilidad, ya que es similar al producido por los electrodos de dimensiones medias o pequeñas a distancias más o menos considerables del sitio en que están instalados.

Si por el electrodo 1 entra una corriente I , ésta atraviesa la resistencia del suelo y la abandona por el contraelectrodo 2 que se supone suficientemente alejado del primero.

La densidad de corriente J en la superficie semiesférica del electrodo será:

$$J_0 = I/A = I/2\pi r_0^2$$

A = área de la semiesfera

La densidad en un punto del suelo situado a una distancia r desde el centro de la semiesfera será: $\Delta \sim \frac{I}{2\pi r^2}$

$$J_r = I/2\pi r^2$$

Tómese ahora un elemento de volumen del suelo cuya longitud coincide con la dirección de la corriente y cuya área transversal coincide con las superficies equipotenciales del campo.

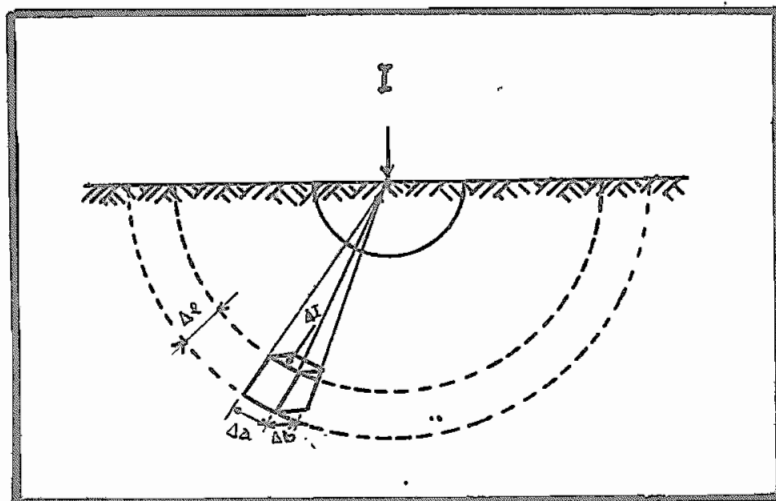


Fig. 2.2.- Electrodo Semiesférico.

Partiendo de la fórmula general para cálculo de la resistencia de un cuerpo:

$$R = \rho \cdot l/A$$

se tiene que la resistencia del volumen de tierra es:

$$R = \rho \cdot \Delta l / \Delta A$$

la corriente I provoca en este elemento de volumen una caída de tensión:

$$\Delta U = \Delta I \cdot \Delta R$$

a su vez:

$$J = \Delta I / \Delta A \Rightarrow \Delta I = J \cdot \Delta A$$

de donde:

$$\Delta U = J \cdot \Delta A \cdot \rho \cdot \Delta l / \Delta A = \rho \cdot J \cdot \Delta l$$

$$\Delta U / \Delta l = J \cdot \rho$$

esta es la caída de potencial por unidad de longitud o "intensidad del campo eléctrico E". O sea,

$$E = \rho \cdot J$$

a una distancia r del centro de la semiesfera y considerando que:

$$J = I / 2\pi r^2$$

Se tiene la intensidad del campo eléctrico en cualquier punto:

$$E = \rho I / 2\pi r^2 \quad \text{Ec. 2.1}$$

II.2.- TIPOS DE ELECTRODOS:

Para la conducción de la corriente a tierra son apropiados todos los elementos buenos conductores que pueden ser introducidos en el suelo (cañerías de agua, partes metálicas de edificios, etc.), o pueden utilizarse otros elementos diseñados exclusivamente con el objeto de poner a tierra las instalaciones eléctricas., tales como electrodos en forma de varillas, láminas, tubos, placas, etc. Las aplicaciones de cada caso se verán a su oportunidad.

II.2.1.- Electrodos Simples:

II.2.1.a.- Electrodo semiesférico:

La forma más simple de -

electrodo es el semiesférico. El campo eléctrico ocasionado por este electrodo es completamente simétrico alrededor del centro del mismo.

Para la deducción de la fórmula de la distribución de potencial y la resistencia del electrodo, supongamos que la resistencia específica del electrodo es pequeña en relación con la del suelo. Además supongamos que a una distancia considerable del electrodo, el suelo esté rodeado por una capa de potencial "cero" (tierra de referencia).

De esta forma entre la esfera y la tierra de referencia existe una tensión U_0 , y entre ellas circula una corriente (I) .

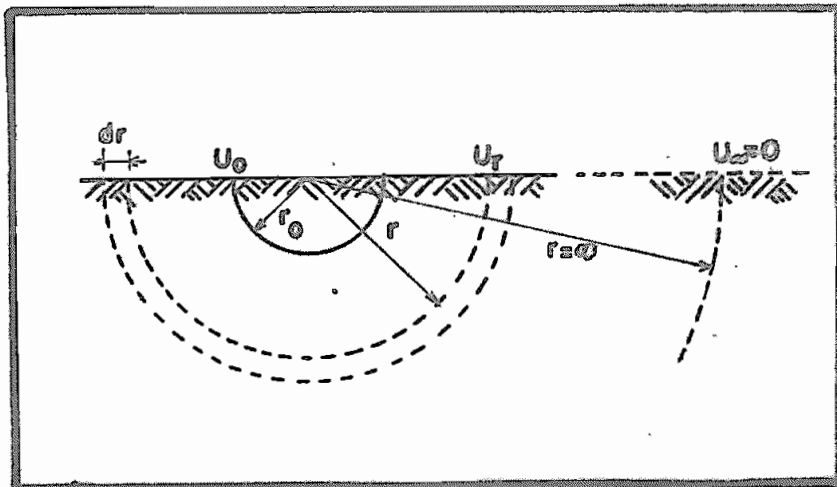


Fig.2.3.- Electrodo semiesférico

La resistencia de una capa de tierra concéntrica al electrodo, de radio r y de espesor dr será:

$$dR = \rho \cdot dr / A$$

$$A = 2\pi r^2$$

$$dR = (\rho / 2\pi) \cdot dr / r^2$$

la caída de tensión en esta capa de tierra será:

$$dU = I \cdot dR$$

$$dU = I \rho / 2\pi \cdot dr / r^2$$

Ahora bien el potencia U_r de esta capa de espesor infinitesimal con relación a la tierra de referencia sería:

$$\begin{aligned} U_r &= \int_r^{\infty} dU = \rho I / 2\pi \cdot \int_r^{\infty} dr / r^2 \\ &= \rho I / 2\pi \left[-1/r \right]_r^{\infty} \\ U_r &= \rho I / 2\pi r \end{aligned}$$

Ec. 2.2

Esto es para una capa de radio r en general. El potencial del electrodo semiesférico de radio r_0 será:

$$U_{r_0} = \rho I / 2\pi r_0$$

y por lo tanto su resistencia será:

$$R_e = U_{r_0} / I = \rho / 2\pi r_0$$

$$R_e = \rho / 2\pi r_0$$

Ec. 2.3

Se puede hallar una relación entre el potencial de un punto cualquiera del suelo con respecto al potencial del electrodo, que varia según la distancia a que se encuentre

dicho punto del suelo con respecto al electrodo.

$$U_r/U_{r_0} = \frac{\rho I / 2\pi r}{\rho I / 2\pi r_0} = r_0/r$$

$$U_r/U_{r_0} = r_0/r$$

que conduce al gráfico de la Fig. 2.4

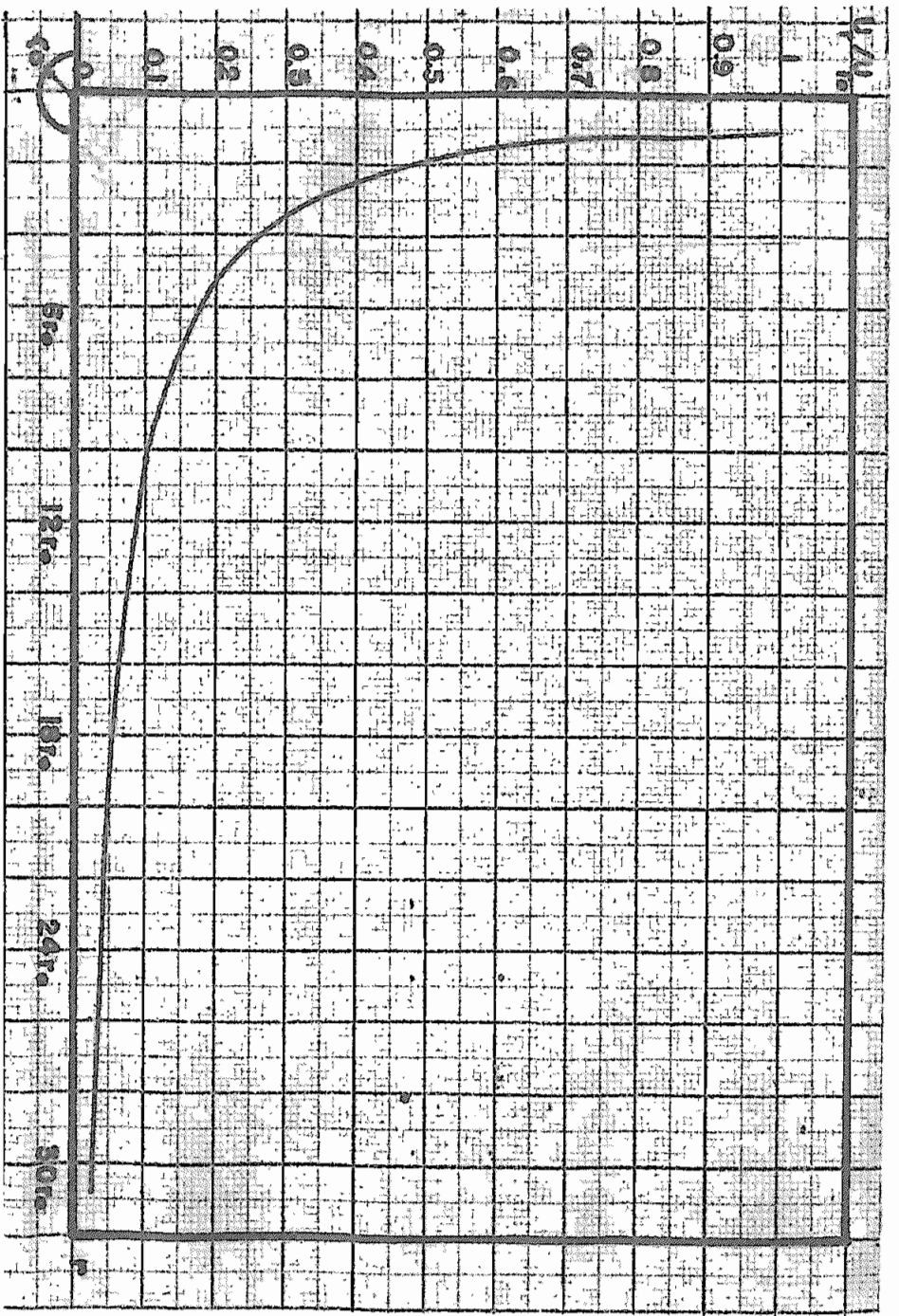


Fig. 2.4.- Distribución del potencial ocasionado por un e lectrodo semiesférico.

Tensión de Paso:

Se considera para efectos de la determinación

de la tensión de paso, que el paso de una persona abarca u na longitud de 1 metro, por lo tanto la diferencia de potencial entre dos puntos distantes entre sí 1 metro, nos dará - la tensión de paso.

Denominemos en general a la longitud de un paso "p". En este caso la diferencia de potencial entre dos puntos situados a distancias: "r" y "r+p" desde el centro del electrodo, será según la fórmula general y de acuerdo a la Fig. 2.5

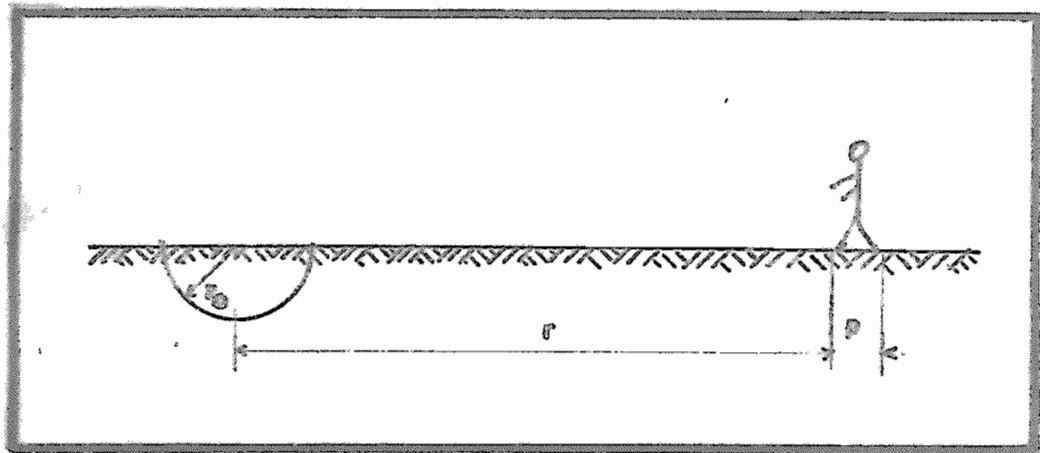


Fig. 2.5.- Tensión de Paso, Electrodo Semiesférico.

$$U_r = \rho I / 2\pi r$$

$$U_{r+p} = \rho I / 2\pi (r+p)$$

$$U_{\text{paso}} = U_r - U_{r+p} = \rho I / 2\pi r - \rho I / 2\pi (r+p) = \rho I / 2\pi \left[1/r - 1/(r+p) \right]$$

$$U_p = (\rho I / 2\pi) p^2 / r(r+p)$$

Ec. 2.4

Electrodos bajo la superficie de la tierra:

En el caso anterior se ha supuesto una semiesfera, supóngase ahora una esfera, - que se encuentra rodeada completamente por tierra y así mismo a una distancia considerable una capa conductora de potencial cero. A la esfera entra una corriente $2I$.

La resistencia de una capa infinitesimal de tierra de espesor dr será:

$$dR = \rho dr / 4\pi r^2$$

la caída de tensión en esta capa será:

$$dU = 2I \cdot dR = 2I\rho dr / 4\pi r^2$$

y el potencial de esta capa de tierra con respecto a la tierra de referencia será:

$$U_r = \int_r^{\infty} dU = 2I\rho / 4\pi \left(\int_r^{\infty} dr / r^2 = 2I\rho / 4\pi \left[-1/r \right]_r^{\infty} \right.$$

$$U_r = 2I\rho / 4\pi r \quad \text{Ec. 2.5}$$

el potencial del electrodo de radio r_0 será:

$$U_{r_0} = 2I\rho / 4\pi r_0 \quad \text{Ec. 2.6}$$

y por lo tanto su resistencia es:

$$R_e = U_{r_0} / 2I = \rho / 4\pi r_0 \quad \text{Ec. 2.7}$$

(Recuérdese que se supuso que entraba una corriente $2I$ en la Esfera).

Como se ve el potencial de la esfera dividido para la corriente total que la atravieza ($2I$) es la resistencia de

la esfera.

Supóngase ahora que a través de la esfera y por su centro se practica un corte de tal forma de dividir a esta y a la tierra que la rodea en dos semiregiones idénticas. Como se ve de esta forma no se altera en absoluto la distribución del campo eléctrico. Cada semiesfera conducirá la mitad de la corriente o sea I . Se puede ahora separar definitivamente la una semiregión, pudiendo en este caso representar el plano de corte, la superficie del suelo.

Puesto que la semiesfera es ^{igual} igual potencial que la esfera conduce la mitad de corriente es lógico que su resistencia será el doble, o sea:

$$R_{\text{semiesfera}} = \rho / 2\pi r_0 \quad \text{Ec. 2.3}$$

como se nota, siguiendo este razonamiento que nos servirá - para ulteriores demostraciones, se ha llegado al mismo resultado anterior.

Supongamos ahora 2 esferas, así mismo rodeadas completamente de tierra y separadas entre sí una distancia igual a $2L$ entre sus centros. Cada electrodo lleva una corriente I . El campo eléctrico es el indicado en la Fig. 2.6.

Cuando la profundidad L es finita, mientras permanece - grande con relación al radio, la no uniformidad debida a la superficie del suelo, puede eliminarse sobreponiendo la imagen del electrodo y haciendo que por el fluya una misma corriente I .

001594

Consideraciones de simetría muestran que el campo en el suelo permanece inalterado y más aún el campo de un electrodo no es influenciado por el otro. El resultado es que el campo en toda el área es la simple superposición de los efectos individuales de los dos electrodos.

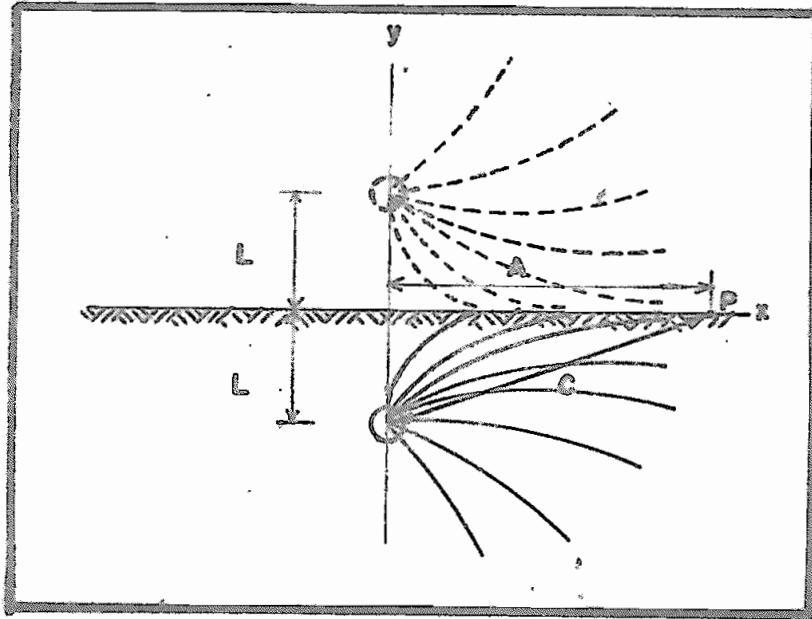


Fig. 2.6.- Electrodo esférico enterrado y su imagen.

Las dos esferas forman campos eléctricos iguales. A lo largo del eje x se forma un límite entre los dos campos - que divide al mismo tiempo la masa de tierra que rodea a las dos esferas en dos semiregiones y que el plano de corte coincidente con el eje x representa la superficie del suelo, igual que antes la distribución del campo no varía. Se tendrá entonces el caso de una esfera enterrada en el suelo a

una profundidad L con un campo eléctrico cuyas líneas de fuerza tienen como límite la superficie del suelo.

El potencial de la esfera, se forma de dos componentes- el primero que es el propio de la esfera enterrada y el segundo el correspondiente al potencial generado en ella por su imagen ubicada a una distancia $2L$.

Su propio potencial es:

$$U_{r_0} = I \rho / 4\pi r_0$$

Y la originada por su imagen es:

$$U = I \rho / 4\pi 2L$$

el potencial total de la esfera será entonces

$$U_{\text{esfera}} = (I\rho/4\pi) \cdot (1/r_0 + 1/2L)$$

Y por lo tanto su resistencia:

$$R_{\text{esfera}} = U/I = (\rho/4\pi) (1/r_0 + 1/2L) \quad \text{Ec. 2.9.}$$

II.2.1.b.- Electrodo Tubular:

Supongamos un electrodo tubular- de longitud $2L$ rodeado completamente de tierra y a una distancia infinita el contraelectrodo de potencial cero (tierra de referencia). Por el electrodo circula una corriente $2I$.

El potencial de un punto P del suelo será originado - por la acción conjunta de todos los elementos " dl " del elec-

trodo.

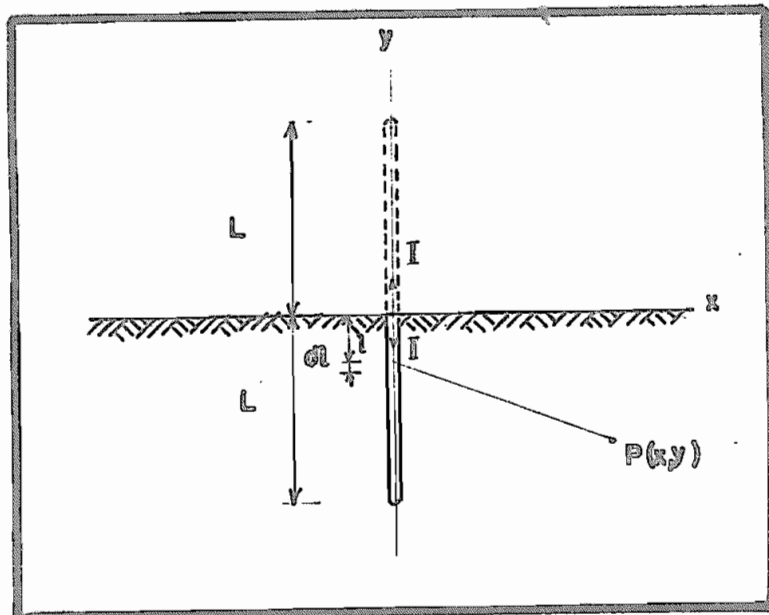


Fig. 2.7.- Electrodo tubular y su imagen.

Ahora bien un elemento "dl" originará un campo proporcional a la corriente: $2I \cdot dl / 2L$.

La distancia desde el punto P al elemento "dl" es:

$$\sqrt{x^2 + (y-1)^2}$$

correspondiente con la fórmula del potencial para una esfera se tiene:

$$dU = 2I \cdot \frac{dl}{2L} \cdot \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + (y-1)^2}}$$

como se dijo, el potencial del punto P será influenciado por

todas las partículas, o sea:

$$U = \int_{-L}^L dU = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \int_{-L}^L \frac{dl}{\sqrt{x^2 + (y-1)^2}}$$

$$U = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln (y-1 + \sqrt{(y-1)^2 + x^2}) \right]_{-L}^L$$

$$U = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + (y+1)^2} + y+L}{\sqrt{x^2 + (y-1)^2} + y-L} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Suponiendo como antes la superficie del suelo coincidente con el eje x, tendremos que para los puntos situados en la superficie del suelo:

$$y = 0 \quad x = m \cdot L$$

siendo m un parámetro arbitrario; por lo tanto:

$$U = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \ln \frac{\sqrt{m^2 L^2 + L^2} + L}{\sqrt{m^2 L^2 + L^2} - L}$$

$$U = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \ln \frac{\sqrt{m^2 + 1} + 1}{\sqrt{m^2 + 1} - 1} = I \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln K$$

$$U = I \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \ln K.$$

Si el electrodo tiene un diámetro "d", se tiene que las condiciones son: $y = 0$; $x = d/2$; de donde:

$$U_o = 2I \frac{\rho}{8\pi L} \ln \frac{\sqrt{(d/2)^2 + L^2} + L}{\sqrt{(d/2)^2 + L^2} - L}$$

puesto que $d/2$ es muy pequeño comparado con L , se tiene:

$$\sqrt{(d/2)^2 + L^2} \approx \frac{d^2}{8L} + L$$

reemplazando:

$$U_o = 2I \frac{\rho}{8\pi L} \ln \frac{\frac{d^2}{8L} + 2L}{d^2/8L}$$

ahora bien:

$$\frac{d^2}{8L} + 2L \approx 2L$$

de donde:

$$U_o = 2I \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

y por lo tanto la resistencia del electrodo, supuesto una longitud $2L$ será :

$$R = \frac{U_o}{2I} = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad \text{Ec. 2.11.}$$

Igual que antes separemos ahora el campo en dos regiones por medio de un plano de corte perpendicular al electrodo y que pase por el centro. La distribución del campo no varía. La parte inferior será un electrodo de longitud "L" enterrado en el suelo y la parte superior será el medio ambiente. La resistencia del electrodo de longitud L será el doble que

la de longitud $2L$, o sea:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad \text{Ec. 2J2}$$

II.2.1.c.- Electrodos en forma de cinta o cable (Horizontales)

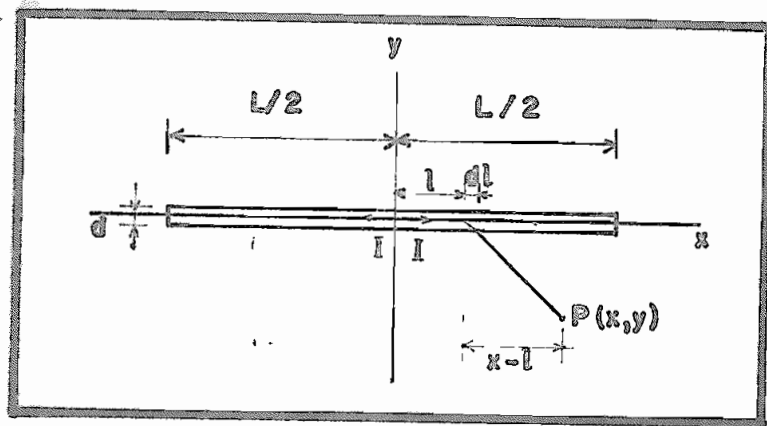


Fig. 2.8.- Electrodo de cinta y su imagen.

Una forma de electrodos muy importantes es esta en que los electrodos tienen forma de bandas, cintas o hilos colocados horizontalmente dentro de la superficie de la tierra- (consideremos primero que el cálculo de la resistencia como si el electrodo estuviera colocado directamente en la superficie).

Supongamos un electrodo (Fig. 2.8) colocado bajo tierra y rodeado completamente por ella. Tenga el electrodo una longitud total L y cada una de sus mitades esté atravesada por-

una corriente I . La sección del electrodo sea circular y de diámetro d .

La corriente que aporta cada elemento dl para la formación del campo es: $2I \frac{dl}{L}$

En el punto $P(x,y)$ se origina un campo cuyo potencial-causado por la partícula dl , de acuerdo a la fórmula de potencial de una esfera es:

$$dU = 2I \frac{dl}{L} \cdot \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{z}$$

siendo Z la distancia del elemento dl al punto P , o sea:

$$z = \sqrt{(x-l)^2 + y^2}$$

de donde:

$$dU = 2I \frac{dl}{L} \cdot \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2}}$$

el potencial en P debido a todas las partículas se obtendrá integrando esta ecuación entre los límites menos $-L/2$ y $L/2$.

Luego de integrar se obtiene :

$$U = 2I \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{x + L/2 + \sqrt{(x+L/2)^2 + y^2}}{x - L/2 + \sqrt{(x-L/2)^2 + y^2}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Para la superficie del electrodo, o sea para:

$$x = 0 \quad ; \quad y = d/2$$

y considerando que $d/2$ es muy pequeño comparado con $L/2$ y -
por lo tanto:

$$\sqrt{(L/2)^2 + (d/2)^2} \approx d^2/8L + L/2$$

se llega a:

$$U = (2I \rho / 4\pi L) \cdot 2 \ln (2L/d) \quad \text{Ec. 2.13.d}$$

y por lo tanto la resistencia del electrodo será:

$$R = U/2I = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d}$$

Supongamos ahora separar la región en dos subregiones cuyo plano de corte coincide con el eje x , desechando de esta forma la parte superior. Entonces se puede pensar en la parte inferior, que representa un electrodo de longitud L situado en la superficie del suelo. Esta mitad de electrodo tiene el mismo potencial, sin embargo conduce solo la mitad de la corriente, por lo tanto su resistencia será el doble que la anterior, o sea:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} \quad \text{Ec. 2.14.}$$

siendo:

R = resistencia del electrodo en ohmios.

ρ = resistencia específica del suelo en ohmios-metro.

L = longitud del electrodo en metros.

d = diámetro del electrodo en metros. En caso de una banda plana se toma d como la mitad de su ancho.

II.2.1.d.- Electrodo Anular:

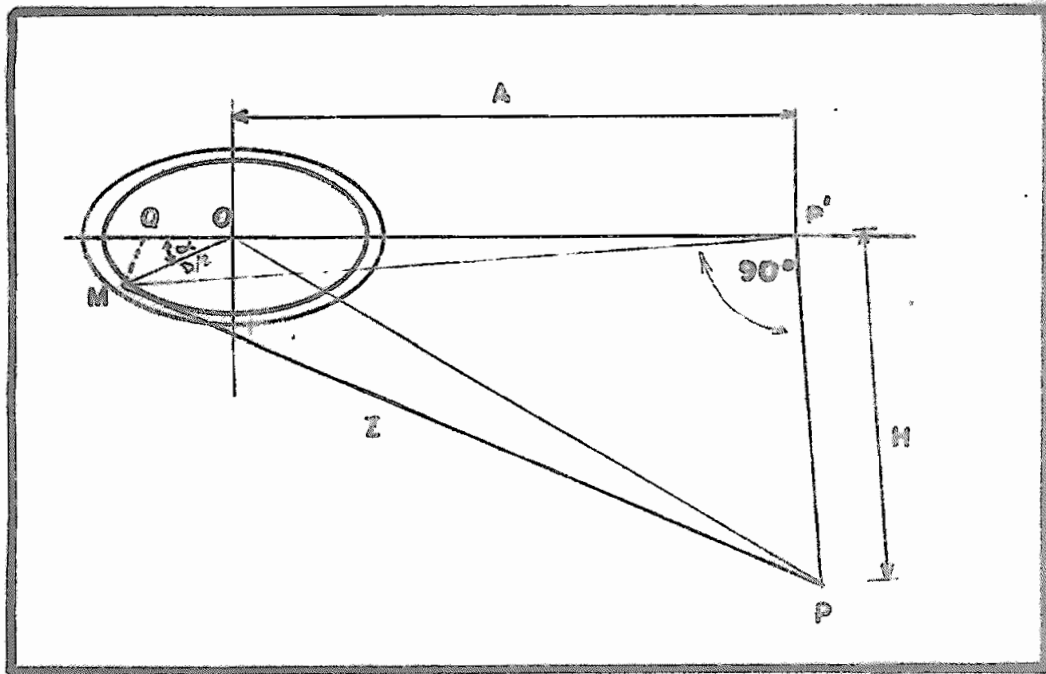


Fig. 2.9.- Electrodo anular en perspectiva.

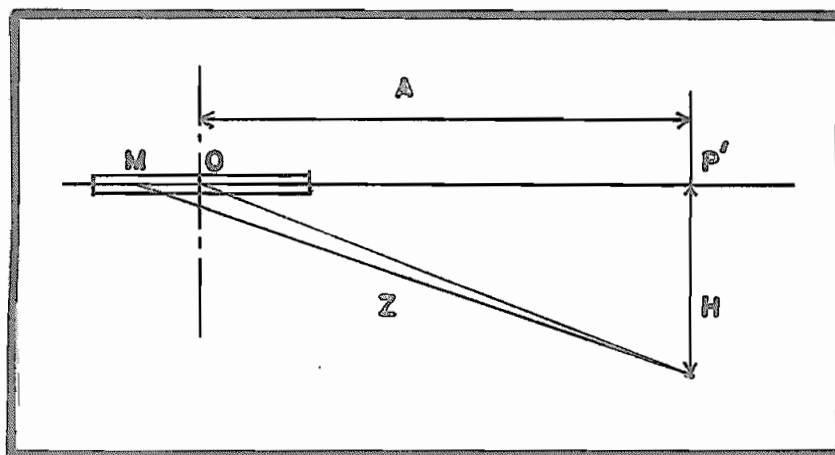


Fig. 2.10.- Electrodo Anular en corte.

Generalmente los electrodos en forma de banda o cinta, se instalan en forma cerrada, formando anillos o polígonos - todos los cuales caen bajo el concepto de electrodos anulares.

Supóngase un electrodo anular atravezado por una corriente I . Un elemento " dl " del mismo contribuirá a la formación del potencial en un punto P del terreno, con una corriente igual a: $I \cdot dl/\pi D$; siendo D el diámetro del electrodo.

El Potencial en el punto P debido a este elemento " dl " será:

$$dU = I \cdot \frac{dl}{\pi D} \cdot \frac{\rho}{4\pi Z} = I \frac{\rho}{4\pi D} \cdot \frac{dl}{Z}$$

y debido a todos los elementos del electrodo el potencial en P será:

$$U = I \frac{\rho}{4\pi D} \cdot \int \frac{dl}{Z}$$

$$U = I \frac{\rho}{4\pi D} \cdot K \quad \leftarrow K = \int dl/Z \quad \text{Ec. 2. 15.}$$

De las Figs. 2.9 y 2.10 se tiene que:

$$Z = \sqrt{H^2 + \overline{MP'}^2}$$

$$\overline{MP'}^2 = \overline{MQ}^2 + \overline{QP'}^2 = \overline{MQ}^2 + (\overline{QO} + \overline{OP'})^2$$

$$\overline{MP'}^2 = (D/2 \cdot \text{sen}\alpha)^2 + (D/2 \cdot \text{cos}\alpha + A)^2$$

$$Z = \sqrt{H^2 + (D/2 \cdot \text{sen}\alpha)^2 + (D/2 \cdot \text{cos}\alpha + A)^2}$$

Si se llama ahora:

$$H = p \cdot D/2$$

$$A = q \cdot D/2$$

se llega finalmente a:

$$Z = \frac{D}{2} \sqrt{p^2 + \operatorname{sen}^2 \alpha + (\cos \alpha + q)^2}$$

Por otra parte se tiene:

$$dl = D/2 \cdot d\alpha$$

o sea:

$$K = \int dl/Z = \int d\alpha / \sqrt{p^2 + \operatorname{sen}^2 \alpha + (\cos \alpha + q)^2}$$

La resolución de esta integral, es muy complicada. Con el fin de obviar se aproximará el elemento "dl" al incremento Δl :

$$dl \cong \Delta l$$

con lo cual se tiene :

$$K = \int dl/Z \cong \sum \Delta l/Z$$

La longitud del anillo (πD) se puede subdividir en tantas porciones cuanta precisión se desee, así por ejemplo su póngase dividirlo en 36 partes, de donde:

$$\Delta l = \pi D / 36 = 0.174 \cdot D/2$$

$$\frac{\Delta l}{Z} = \frac{0.174}{\sqrt{p^2 + \operatorname{sen}^2 \alpha + (\cos \alpha + q)^2}}$$

Ec. 2.16

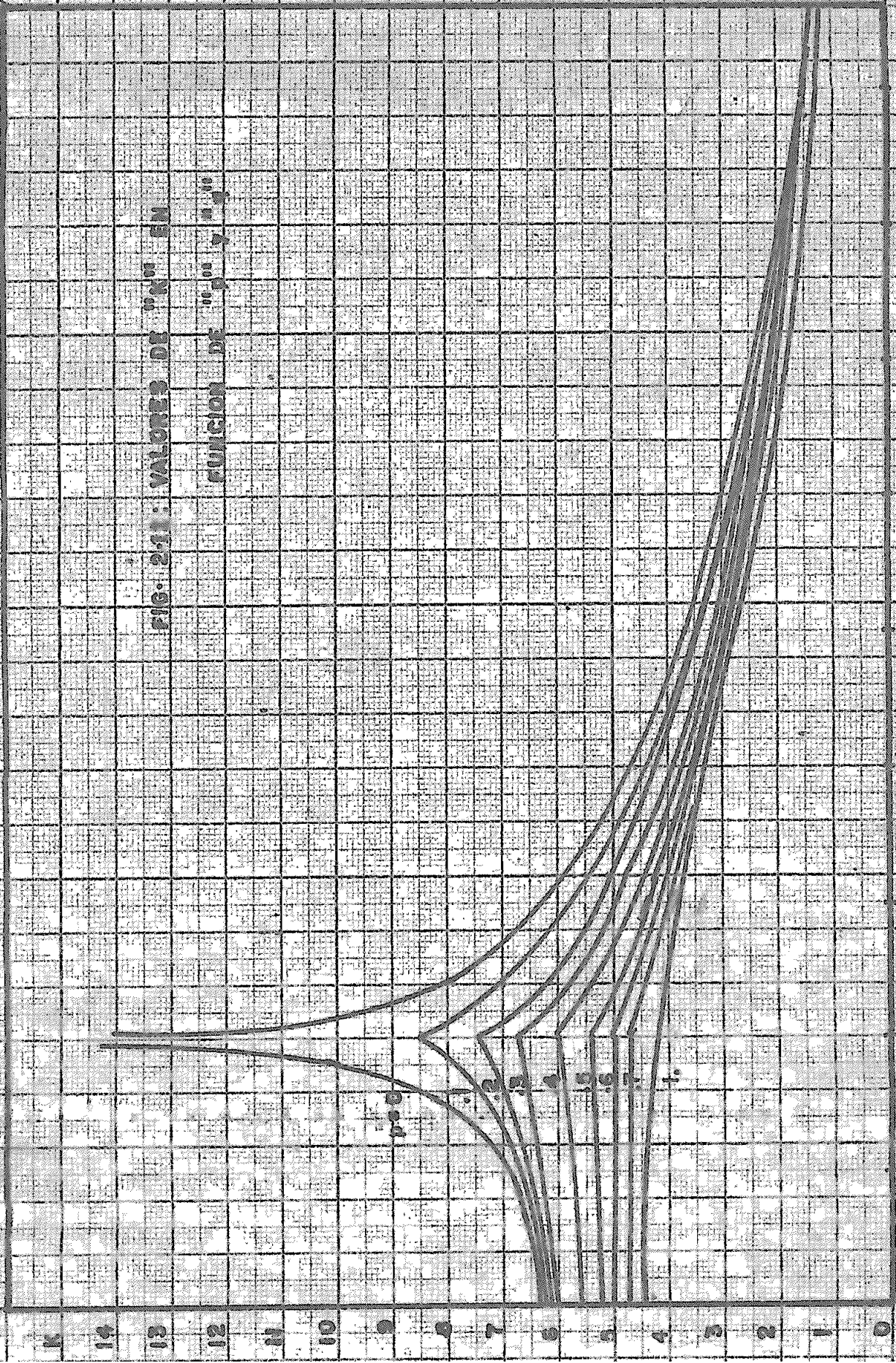
Dando valores determinados a p y q se tendrá localizado exactamente el punto P en donde se trata de encontrar el potencial y dando valores sucesivos a α en pasos de 10 grados - y se obtendrán valores de $\Delta l/Z$, cuya suma es el valor de K , que multiplicada por el coeficiente $(I \rho / 4 \pi D^2)$ dará el valor del potencial en el punto P , en suma para cada pareja de valores $p-q$, serán necesario hacer el cálculo de 36 valores de $\Delta l/Z$ cuya suma es igual a K . En la fig. 2.11 se indica una tabla en la que se da estos valores de K . en función de pq .

Sin embargo para valores de q muy cercanos a 1, esto es para las proximidades de la superficie del anillo y para el potencial del anillo mismo los valores de K que da la tabla de la Fig. 2.11 no son muy precisas, por lo que es necesario introducir el siguiente artificio para el cálculo de la distribución de potencial en las proximidades del anillo y en el anillo mismo, siendo este último cálculo el más interesante.

Sea un punto P situado en la superficie del anillo O próximo a éste, los elementos del anillo cercanos al punto P presentan con respecto a éste una distancia Z infinitesimal - que es de donde proviene la inexactitud; para obviarla se tomarán cuatro de los 36 elementos totales en que se dividió el anillo situados simetricamente a los lados del punto P , como se indica en la fig, 2.12, obteniendose así un trozo de anillo (A-B) compuesto de 4 elementos, cuyo aporte de potencial puede calcularse con la Ec. 2.13 ya que este trozo

FIG. 21. VALORES DE "K" EN

FUNCIÓN DE $\frac{t}{a}$ Y $\frac{t}{b}$



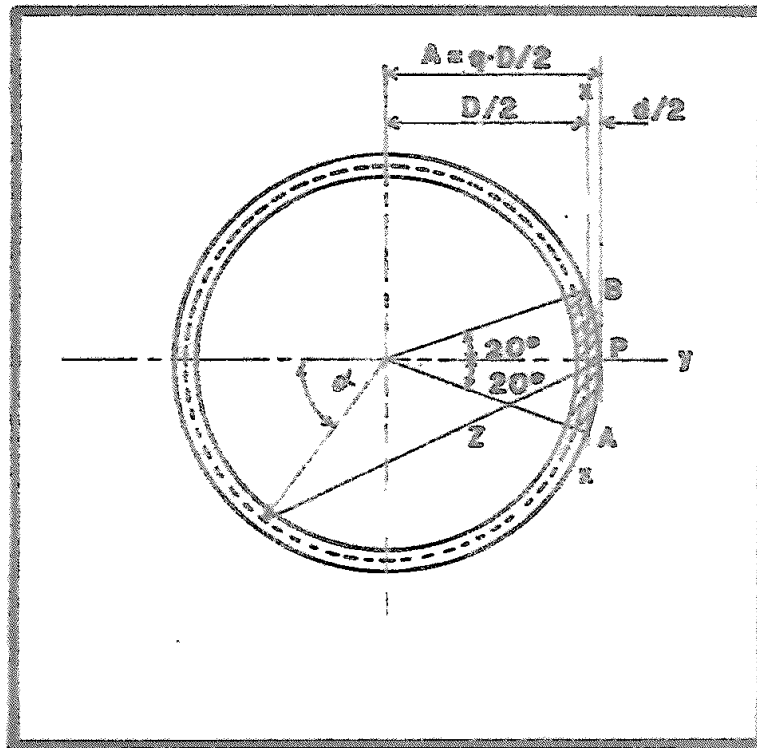


Fig. 2.12.- Electrodo Anular.

de anillo es prácticamente recto pudiendo por lo tanto considerarse como una banda de longitud $L = 4 \cdot \pi D / 36$ (ya que la longitud de cada elemento es $\pi D / 36$).

$$U = 2I' \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{y^2 + (x+L/2)^2} + x+L/2}{\sqrt{y^2 + (x-L/2)^2} + x-L/2}$$

para el punto P situado en la mitad de A-B será: $x=0$ y su distancia "y" hasta el diámetro medio del anillo será $d/2$.

siendo d el diámetro de la sección del anillo (para barras - se utiliza $d=1/2$ del ancho de la banda); a su vez:

$$A = q \cdot D/2 = D/2 + d/2$$

$$x = d/2 = q \cdot D/2 - D/2$$

$$y = (q-1) \cdot D/2 = d/2 \implies (q-1) = d/D$$

el aporte de corriente de las 4 partículas será: $4/36 \cdot I$ que equivale al valor $2I$ de la ecuación 2.13. En resumen en dicha ecuación habrá que hacer las siguientes sustituciones, - para obtener el aporte de potencial ΔU de las 4 partículas - consideradas:

$$L = 4\pi D/36$$

$$x = 0$$

$$y = (q-1) D/2$$

$$2I = 4/36 \cdot I$$

con lo que se llega finalmente a:

$$U^r = I \frac{\rho}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{0.25(d/D)^2 + 0.174^2} + 0.174}{\sqrt{0.25(d/D)^2 + 0.174^2} - 0.174} \quad \text{Ec. 2.17}$$

a este potencial ΔU debido a los 4 elementos de anillos habrá que añadir el aportes de los restantes 32 elementos del anillo según la ecuación 2.16 haciendo variar el ángulo en tonces de 0° a 160° y luego de 200° a 350° .

La ecuación 2.17 puede escribirse también:

$$\Delta U' = I \frac{\rho}{4\pi D} K'$$

$$\text{siendo } K' = \frac{\Delta l}{z} = \ln \frac{\sqrt{0.25 (d/D)^2 + 0.174^2} + 0.174}{\sqrt{0.25 (d/D)^2 + 0.174^2} - 0.174} \quad \text{Ec. 2.18}$$

de tal forma que el potencial total del punto P y por lo tanto el anillo será:

$$U_0 = U_1 + U'$$

siendo U' el potencial ocasionado por los 4 elementos citados y U₁ el ocasionado por los 32 restantes o sea:

$$U_0 = I \frac{\rho}{4\pi D} (K_1 + K') = I \frac{\rho}{4\pi D} K_0 \quad \text{Ec. 2.19}$$

debiendo K₁ calcularse por la Ec. 2.16 para 32 elementos y K' por la Ec. 2.18 para los cuatro elementos restantes.

Es interesante tener una tabla de los valores K₀ para diferentes relaciones D/d.

Sea: D/d = 1000 como por ejemplo, para calcular el K₀ para esta relación:

a) cálculo de K':

Aplicando la Ec. 2.18. se tiene:

$$K' = \ln \frac{\sqrt{0.25 (0.001)^2 + 0.174^2} + 0.174}{\sqrt{0.25 (0.001)^2 + 0.174^2} - 0.174} = 13,2$$

b) Cálculo de K_1 :

Aplicando la Ec. 2.16, se tiene:

$$\Delta l/Z \approx 0.174/\sqrt{1 + 2q\cos\alpha + q^2}$$

y para el presente caso los valores de p y q son:

$$p = 0$$

$$q-1 \approx d/D = 0.001 \quad q=1.001$$

y por lo tanto:

$$\Delta l/Z = 0.174/\sqrt{2,002001 + 2,002 \cos\alpha}$$

haciendo variar el ángulo α de 0° a 160° y de 210° a 350° , se obtienen los diferentes valores de $\Delta l/Z$:

α	$\Delta l/Z$	α	$\Delta l/Z$	α	$\Delta l/Z$
0°	0.0869	130°	0.2060	260°	0.1350
10°	0.0875	140°	0.2560	270°	0.1230
20°	0.0880	150°	0.3020	280°	0.1140
30°	0.0900	160°	0.4960	290°	0.1060
40°	0.0925	170°	-----	300°	0.1000
50°	0.0960	180°	-----	310°	0.0960
60°	0.1000	190°	-----	320°	0.0925
70°	0.1060	200°	-----	330°	0.0900
80°	0.1140	210°	0.3020	340°	0.0880
90°	0.1230	220°	0.2560	350°	0.0875
100°	0.1350	230°	0.2060		
110°	0.1520	240°	0.1740		
120°	0.1740	250°	0.1520		

Sumando los 32 valores de $\Delta l/Z$ se obtiene: $K_1 = 4.82$

Luego:

$$K_0 = K_1 + K' = 4.82 + 13.2 = 18.02$$

esto para un valor $D/d = 1000$; del mismo modo se pueden calcular los valores de K_0 en la superficie del anillo para diferentes relaciones D/d llegándose de esta forma a la Fig. 2. 13.

Resistencia del Electrodo:

El potencial del electrodo como se vió, viene dado por:

$$U_0 = I \frac{\rho}{4\pi D} \cdot K_0 \quad \text{Ec. 2.20}$$

llamando $N = \frac{\rho}{4\pi D}$ se tiene en forma simplificada.

$$U_0 = I \cdot N \cdot K_0 \quad \text{Ec. 2.21}$$

Ahora se ha considerado como si el anillo estuviera íntegramente rodeado de tierra, si se hace un corte imaginario por la mitad del mismo de tal forma que el plano de corte se a la superficie del suelo, se tendrán 2 electrodos de sección semicircular uno introducido en tierra y otro que es su imagen sobre la superficie del suelo.

El electrodo conduce a tierra ahora sólo la mitad de I y puesto que su potencial es el mismo su resistencia será el doble, o sea:

$$R = U_0 / I = 2NK_0 \quad \text{Ec. 2.22}$$

Anillo Enterrado en el Suelo:

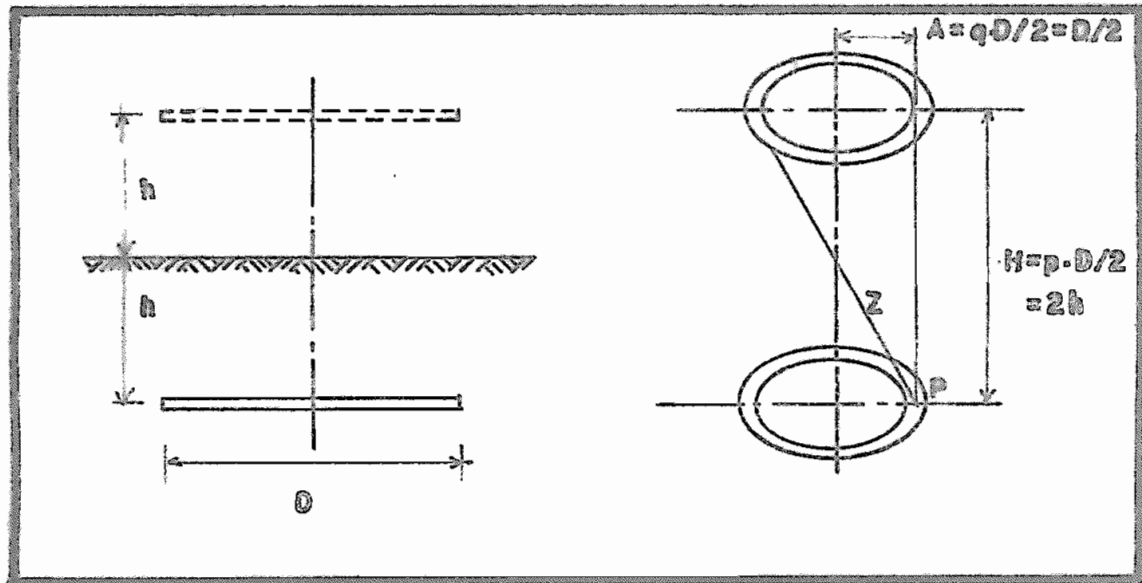


Fig. 2.14.- Electrodo Anular enterrado y su imagen.

Supóngase ahora el electrodo anular enterrado en el suelo a una profundidad h , que conduce a tierra una corriente I . Su potencial vendrá dado por el suyo propio y por el originado por su imagen; o sea:

$$U = U_{11} + U'_{11}$$

Siendo U_{11} su propio potencial a calcularse según la Ec.2.21 y U'_{11} el potencial originado por su imagen, para cuyo cálculo habrá que aplicarse la Ec. 2.15 que a su vez involucra - el conocimiento de los parámetros, "p" y "q" que se pueden deducir de la fig. 2.14; así:

$$p = 2h / (D/2) \quad q = (D/2) / (D/2) = 1$$

con estos valores de p y q se ve el correspondiente valor de K en la Fig. 2.11 para poder aplicar la Ec. 2.15. Se tendrá en definitiva:

$$U = I \frac{\rho}{4\pi D} K_0 + I \frac{\rho}{4\pi D} K = IN (K_0 + K)$$

de donde la resistencia del anillo enterrado a una profundidad h será:

$$R = U/I = N(K_0 + K) \quad \text{Ec. 2.23}$$

II.2.2.- Electrodos Combinados:

II.2.2.a.- Electrodos tubulares verticales paralelos

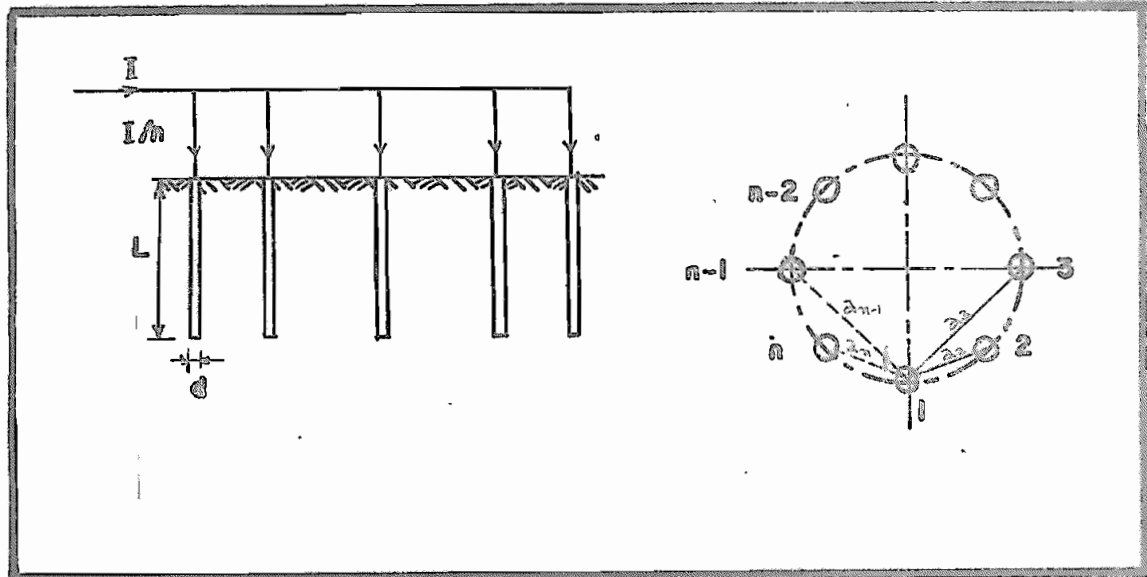


Fig. 2.15 Electrodos Tubulares paralelos.

Si las barras paralelas están ordenadas de manera simétrica, (círculo por ejemplo) la corriente que circula por cada una de ellas, será I/n , siendo I la corriente total y n el número total de barras, según se indica en la Fig. 2.15-

El potencial de una cualquiera de las barras debido a su propia corriente será según la Ec. 2.12:

$$U_o = I/n \cdot \rho / 2\pi L \cdot \ln (4L/d)$$

tomando la superficie del suelo como línea de simetría; o sea: $y=0$, $x=a_n$ (la distancia desde el electrodo n hasta el electrodo cuyo potencial se busca) el potencial ocasionado por cada uno de los electrodos sobre el que se está considerando será según la Ec. 2.10:

$$U = \frac{I}{n} \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{\sqrt{a_n^2 + L^2} + L}{\sqrt{a_n^2 + L^2} - L}$$

y el potencial total en cada electrodo será la suma de su propio potencial más la suma de todos los potenciales ocasionados por los demás electrodos, o sea:

$$U = \frac{I}{n} \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{n=n} \ln \frac{\sqrt{a_n^2 + L^2} + L}{\sqrt{a_n^2 + L^2} - L} \right]$$

y la resistencia R' de cada electrodo será:

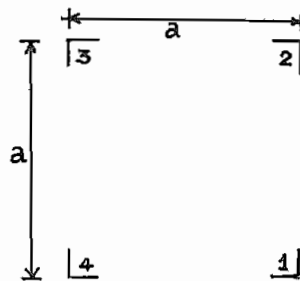
$$R' = \frac{U}{I/n} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{n=n} \ln \frac{\sqrt{a_n^2 + L^2} + L}{\sqrt{a_n^2 + L^2} - L} \right]$$

y la resistencia del conjunto, al ser los electrodos simétricos, de iguales características y estar conectados en paralelo, será: $R = R'/n$:

$$R = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{a^2 + L^2} + L}{\sqrt{a^2 + L^2} - L} \right] \quad \text{Ec2.24}$$

Caso Particular:

Un caso interesante de analizar es el de grandes torres de transmisión cuyas bases de acero van ancladas a bloques de concreto. Las bases tienen 4 puntos de anclaje cada uno de ellos constituidos por una pieza de acero que se comporta como un electrodo tubular vertical.



Sea por ejemplo una torre con 4 puntos de anclaje y la distancia entre ellos sea "a", las piezas de anclaje sean constituidas por acero ángulo "L", de dimensiones tales que el diámetro equivalente sea d , e introducidas una longitud L en el bloque de fundamento.

El potencial del electrodo 1 (por simetría será igual al de los electrodos 2,3 y 4), será:

$$U = \frac{I}{4} \cdot \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} + \frac{1}{2} \left(\ln \frac{\sqrt{a^2 + L^2} + L}{\sqrt{2} + L^2} + \ln \frac{\sqrt{2a^2 + L^2} + L}{\sqrt{2a^2 + L^2} L} \right) \right. \\ \left. + \ln \frac{\sqrt{a^2 + L^2} + L}{\sqrt{a^2 + L^2} - L} \right]$$

y la resistencia del conjunto será:

$$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln \frac{4L}{d} + \ln \frac{\sqrt{a^2 + L^2} + L}{\sqrt{a^2 + L^2} - L} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{2a^2 + L^2} + L}{\sqrt{2a^2 + L^2} - L} \right]$$

Sea por ejemplo una torre con 4 puntos de anclaje de 2-metro ángulo "L" de 0.14 x 0.14 m, introducidos 2.5 m, en el suelo. Sea la distancia entre bloques de 4.5 m. y la resistencia específica del suelo 100 ohmio-metro.

$$d = \sqrt{0.14 \times 0.14} = 0.14 \text{ m.}$$

$$R = 100/8 \cdot \pi \cdot 2.5 \left(\ln \frac{10}{0.14} + \ln \frac{\sqrt{4.5^2 + 2.5^2} + 2.5}{\sqrt{4.5^2 + 2.5^2} - 2.5} \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{2 \times 4.5^2 + 2.5^2} + 2.5}{\sqrt{2 \times 4.5^2 + 2.5^2} - 2.5} \Bigg] \approx 9 \text{ ohm}$$

Distribución de Potencial en la superficie del suelo:

En un -

punto P de la superficie del suelo (Fig. 2.16) para el cual $x=x_n$; $y=0$, el potencial originado en él debido a todos los

electrodos será la suma de los potenciales ocasionados por cada uno de ellos. Tomando en cuenta la Ec. 2.10 e introduciendo en ella los cambios necesarios para el presente caso, que son:

$$I = I/n$$

$x = x_n$ = distancia entre cada electrodo y el punto P.

$$y = 0$$

se tiene:

$$U_x = \frac{I}{n} \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \sum_{n=1}^{n=n} \ln \frac{\sqrt{x_n^2 + L^2} + L}{\sqrt{x_n^2 + L^2} - L}$$

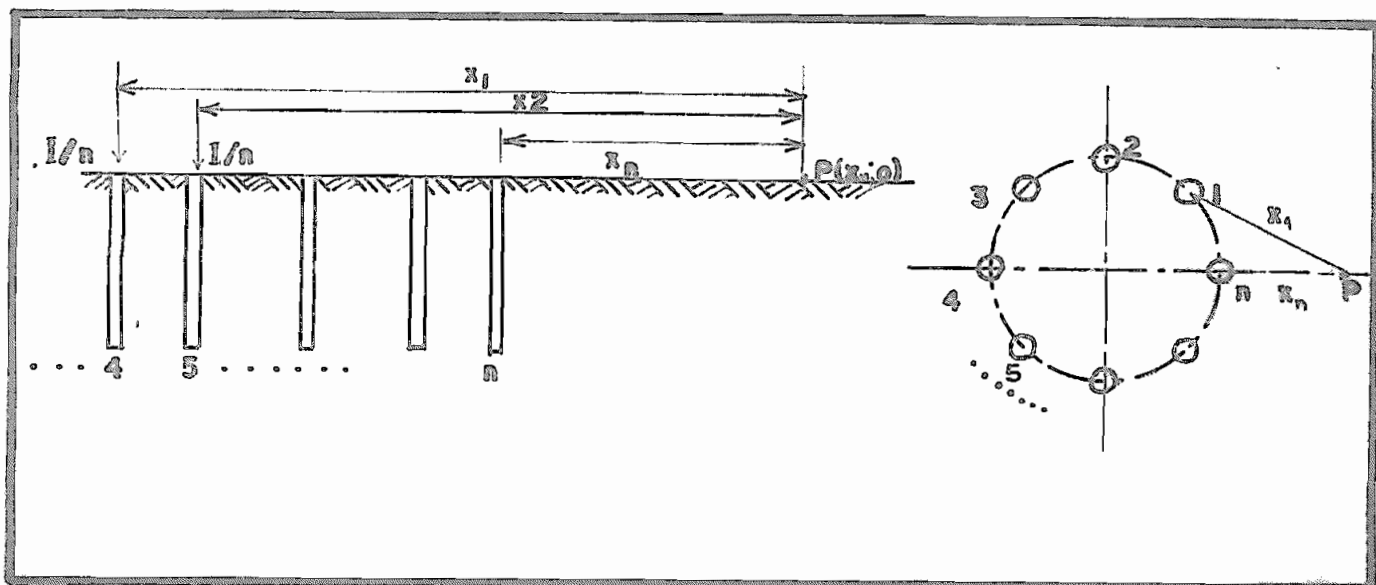
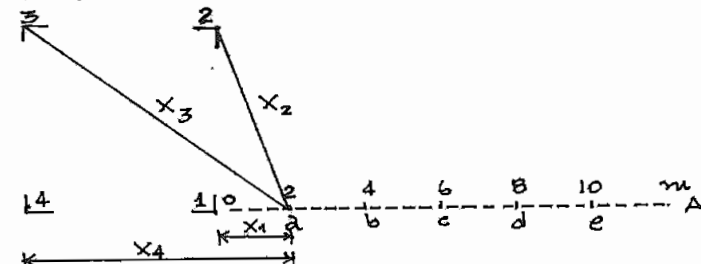


Fig.2.16.- Distribución del potencial en el suelo ocasionado por un grupo de electrodos tubulares paralelos.

En el caso del último ejemplo, se puede calcular la distribución de potencial alrededor de la torre, para lo cual - será necesario hacer el cálculo respectivo para varios puntos de las proximidades de la misma. Con el fin de orientar el cálculo se hará un ejemplo calculando la distribución de potencial en la dirección 1-A.



$$U_x/I = \frac{100}{16 \cdot \pi \cdot 2,5} \cdot \sum_{n=1}^4 \ln \frac{\sqrt{x_n^2 + 6.25} + 2.5}{\sqrt{x_n^2 + 6.25} - 2.5}$$

Siendo este cociente el potencial en voltios por cada amperio que circula a tierra por la torre, para cada punto - en la dirección 1-A (a,b,c,d,e)

Para el punto "a" se tienen los siguientes " x_n ":

$$x_1 = \quad = 2.00 \text{ m.}$$

$$x_2 = \sqrt{2^2 + 4.5^2} = 4.93 \text{ m.}$$

$$x_3 = \sqrt{6.5^2 + 4.5^2} = 7.90 \text{ m.}$$

$$x_4 = 4.5 + 2 = 6.50 \text{ m.}$$

siendo por lo tanto:

$$U_x/I = 0.8 (\ln K_1 + \ln K_2 + \ln K_3 + \ln K_4) \text{ volts/amp.}$$

en donde:

$$K_1 = \frac{\sqrt{x_1^2 + 6.25} + 2.5}{\sqrt{x_1^2 + 6.25} - 2.5} = 7.9 \implies \ln K_1 = 2.06$$

De la misma manera, se pueden calcular los restantes valores, llegándose a:

$$\ln K_1 = 2.06$$

$$\ln K_2 = 0.97$$

$$\ln K_3 = 0.62$$

$$\ln K_4 = 0.76$$

Reemplazando estos valores, se obtiene:

$$(U_x/I)_a = 0.8 (2.06 + 0.97 + 0.62 + 0.76) = 3.53 \text{ V/A}$$

Este cálculo realizado para el punto "a" puede ser efectuado también para los puntos b, c, d y e. El resumen de este cálculo se indica a continuación:

Punto	U_x/I
a	3.53 volts/amp.
b	2.46 "
c	1.90 "
d	1.54 "
e	1.31 "

El potencial de cualquiera de estos puntos, puede darse también como función del potencial del electrodo de puesta a tierra de la torre, que es:

$$U_0 = IR = 9I \text{ voltios}$$

De donde:

$$U_x/ U_0 = (U_x/I)/9$$

Para los diferentes puntos en la dirección 1-A la relación U_x/U_0 es:

Punto:	Torre	a	b	c	d	e
U_x/U_0 :	1.0	0.39	0.27	0.21	0.17	0.146

Estos valores están representados en la Fig. 2.17.

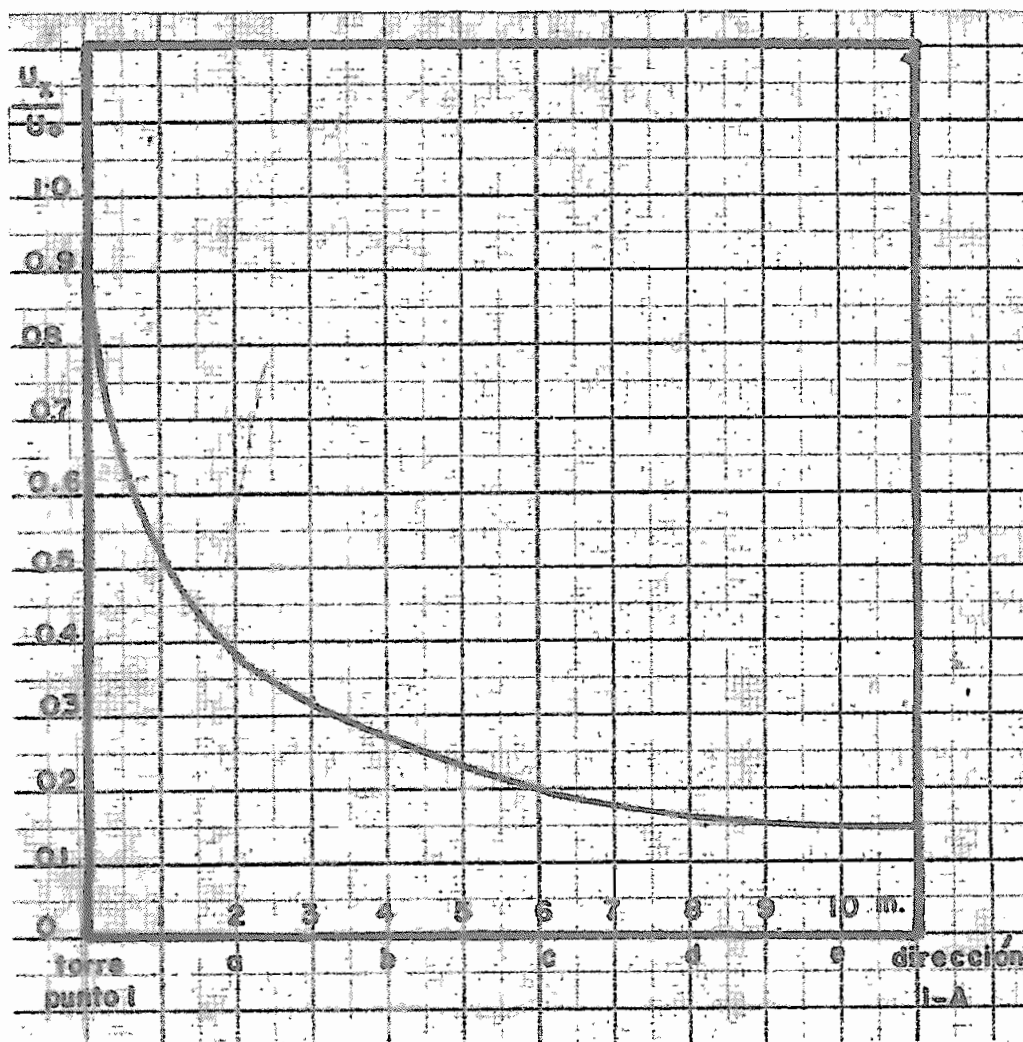


Fig.2.17.- Distribución de potencial en la dirección 1-A.

Tomando valores en varias direcciones, se puede construir un mapa con curvas equipotenciales alrededor de una torre.

II.2.2.b.- Control del Potencial:

Con el fin de disminuir los valores de tensión de contacto y de paso en las proximidades de los electrodos de puesta a tierra, lo que equivale a aplanar la curva de distribución de potencial en la superficie del suelo, se usan además de los electrodos de puesta a tierra elementos adicionales para este objeto, los que para el caso de torres de transmisión pueden ser: anillos colocados alrededor de las torres, electrodos radiales de 2,3 o 4 brazos, etc.

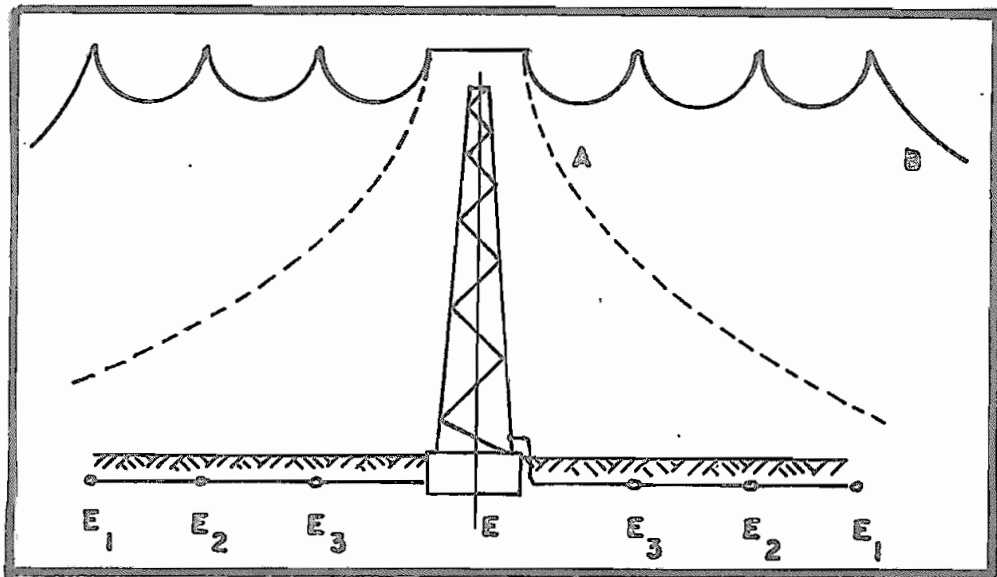


Fig.2.18.- Ilustración del control de potencial.

El efecto que se consigue con el control adicional de potencial, se explica en la Fig. 2.18, en la que se han supuesto como electrodos de control de potencial, 3 anillos concéntricos alrededor de una torre y unidos metálicamente a ella.

La curva "A" indica la distribución del potencial, si se usa solamente el electrodo de conexión a tierra E , mientras que la curva "B" da la distribución con el uso de los electrodos de control de potencial E_1, E_2, E_3 .

Como se puede observar, en el primer caso tanto las tensiones de paso como las de contacto son mucho mayores que para el caso de usar electrodos de control.

En el caso de subestaciones y centrales se utilizan electrodos en forma de mallas que actúan bien por sí mismas como electrodos de control, obteniéndose una distribución muy conveniente del potencial.

Para redes con neutro aislado o puesto a tierra con bobina de inductancia en las que las fallas monofásicas a tierra que son las más frecuentes, no son despejadas inmediatamente, se exige que el potencial del electrodo de puesta a tierra no sea superior a 125 voltios; mientras que en las redes con neutro directamente conectado a tierra en que todas las fallas monofásicas son despejadas inmediatamente no existe un valor fijo del potencial permisible de puesta a

tierra del electrodo, ya que éste depende del tiempo de desconexión de la falla.

Por éstas consideraciones para redes aisladas o con bobina de inductancia será siempre necesario cumplir la condición antes establecida; mientras que para redes con el neutro directamente conectado a tierra, al existir la posibilidad de desconexión inmediata de la falla, será preciso ha-
cer un análisis de la posibilidad que exista de que justa-
mente en el momento de la falla esté o no una persona en -
las proximidades de una región de peligro; lógicamente ta-
les posibilidades serán más grandes en las torres de una línea que atravieza un lugar poblado que en zonas deshabita-
das, por lo tanto éste criterio es útil para determinar la
conveniencia o no de dotar a una determinada torre de un -
control adicional de potencial.

A continuación se hará un estudio de los tipos de elec-
trodos más utilizados para control de potencial.

II.2.2.b.1.- Electrodos con Anillos Concéntricos:

Supónganse-
tres anillos concéntricos enterrados en el suelo (Fig. 2.19)
a profundidades: h_1 , h_2 y h_3 respectivamente, unidos entre-
sí conductivamente y éstos a su vez a la torre sobre la -
cual van a ejercer el control del potencial, de modo que el
potencial en los tres anillos es el mismo, sin embargo las
corrientes que conducen a tierra son diferentes, debido a
sus diferentes dimensiones.

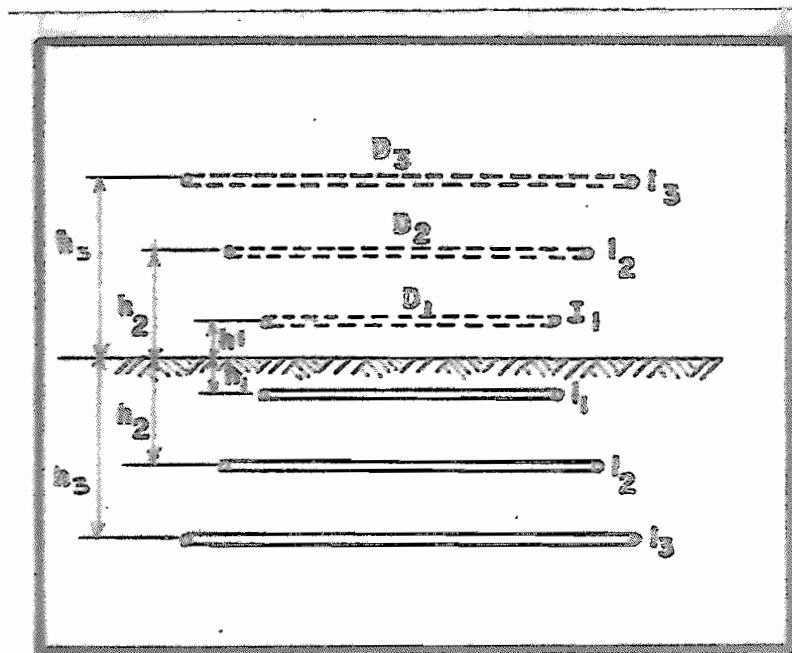


Fig. 2.19.- Electrodo anulares concéntricos y sus imágenes

El potencial de cada anillo (igual para los tres) está constituido por el suyo propio debido a su corriente, por su propia imagen y además por los restantes anillos y sus respectivas imágenes.

Así por ejemplo para el anillo "1":

a.- Su propio potencial es:

$$U_{11} = I_1 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_1} \cdot K_{11} = I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11}$$

debiendo calcularse K_{11} , según las curvas de la Fig. 2.13 - para una relación dada D/d .

b.- El potencial ocasionado por su imagen es:

$$U_{11}^i = I_1 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_1} \cdot K_{11}^i = I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11}^i$$

siendo K_{11}^i el factor que depende de los parámetros "p" y "q" dados por las características geométricas del anillo y su i imagen y que se pueden deducir con facilidad de acuerdo a la Fig. 2.20.

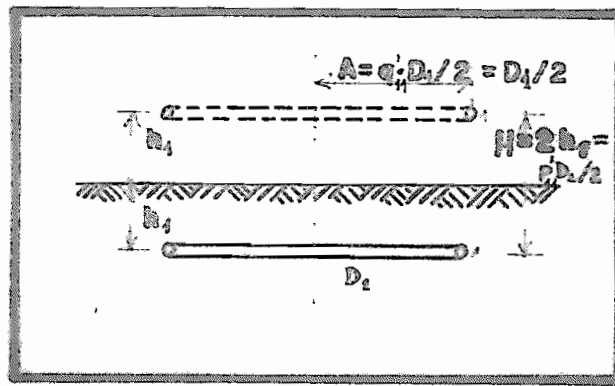


Fig. 2.20.- Anillo "1" y su imagen.

De éste gráfico se deduce que: $q_{11}^i = 1$ y $p_{11}^i = 2h_1 / (D_1 / 2)$ y con éstos valores se puede determinar el correspondiente- K_{11}^i de las curvas de la Fig. 2.11.

c.- El potencial ocasionado por el anillo "2" sobre el "1";

$$U_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_2} \cdot K_{21} = I_2 \cdot N_2 \cdot K_{21}$$

debiendo K_{21} obtenerse de las curvas de la Fig. 2.11 y según los parámetros "p" y "q" a obtenerse de la Fig. 2.21.

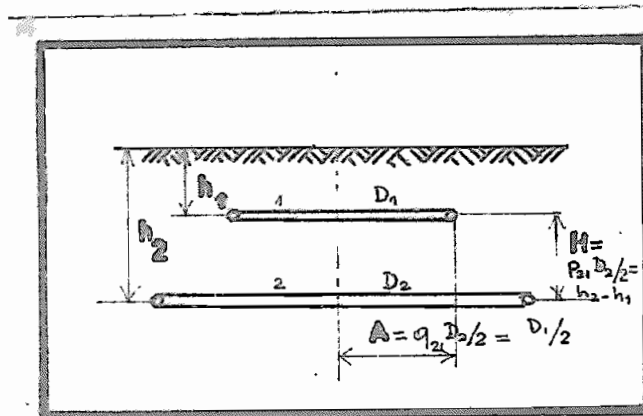


Fig. 2.21.- Anillos "1" y "2".

De éste gráfico se deduce que: $q_{21} = D_1/D_2$ y $p_{21} = \frac{h_2 - h_1}{D_2/2}$

d.- El potencial ocasionado por la imagen del anillo "2" sobre el "1" es:

$$U_{21}^i = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_2} \cdot K_{21}^i = I_2 \cdot N_2 \cdot K_{21}^i$$

debiendo calcularse K_{21}^i según las curvas de la Fig. 2.11 y de acuerdo a los parámetros a deducirse de la Fig. 2.22.

De la Fig. 2.22, se deduce que: $q_{21}^i = D_1/D_2$ y

$$p_{21}^i = \frac{h_1 + h_2}{D_2/2}$$

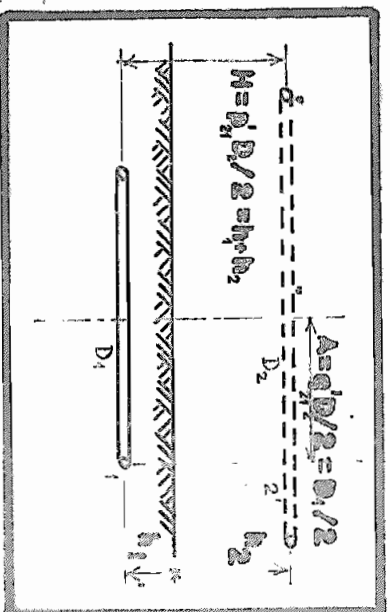


Fig. 2.22.— Anillo "1" e imagen del anillo "2".

e.— El potencial ocasionado por el anillo "3" sobre el "1":

$$U_{31} = I_3 \frac{\rho}{4\pi^2 D_3} \cdot K_{31} = I_3 \cdot N_3 \cdot K_{31}$$

y por similitud con el anillo "2", los valores de p y q para el cálculo de K_{31} de la Fig. 2.11, son:

$$q_{31} = D_1/D_3 \qquad p_{31} = \frac{h_3 \cdot h_1}{D_3/2}$$

f.— El potencial ocasionado por la imagen del anillo "3" sobre el "1" es:

$$U'_{31} = I_3 \frac{\rho}{4\pi^2 D_3} \cdot K'_{31} = I_3 \cdot N_3 \cdot K'_{31}$$

y por similitud con la imagen del anillo "2", los valores de p y q , son:

$$q_{31}^i = D_1/D_3$$

$$p_{31}^i = \frac{h_1 + h_3}{D_3/2}$$

Entonces el potencial total U sobre el anillo "1" se -
rá:

$$U = U_{11} + U_{11}^i + U_{21} + U_{21}^i + U_{31} + U_{31}^i$$

$$U = I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11} + I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11}^i + I_2 \cdot N_2 \cdot K_{21} + I_2 \cdot N_2 \cdot K_{21}^i +$$

$$I_3 \cdot N_3 \cdot K_{31} + I_3 \cdot N_3 \cdot K_{31}^i$$

$$U = I_1 \cdot N_1 (K_{11} + K_{11}^i) + I_2 \cdot N_2 (K_{21} + K_{21}^i) + I_3 \cdot N_3 (K_{31} + K_{31}^i)$$

Y siguiendo el mismo procedimiento para los anillos "2" y -
"3", se puede llegar a ecuaciones similares, de tal forma -
que se obtiene un sistema de tres ecuaciones:

$$U = I_1 N_1 (K_{11} + K_{11}^i) + I_2 N_2 (K_{21} + K_{21}^i) + I_3 N_3 (K_{31} + K_{31}^i)$$

$$U = I_1 N_1 (K_{12} + K_{12}^i) + I_2 N_2 (K_{22} + K_{22}^i) + I_3 N_3 (K_{32} + K_{32}^i)$$

$$U = I_1 N_1 (K_{13} + K_{13}^i) + I_2 N_2 (K_{23} + K_{23}^i) + I_3 N_3 (K_{33} + K_{33}^i)$$

Resistencia del Electrodo:

Para un caso específico, será necesario resolver el sistema de Ecuaciones 2.25, con lo cual se obtienen las corrientes de los 3 anillos en función del potencial del electrodo conjunto (U), o sea:

$$I_1 = f(U) \qquad I_2 = f(U) \qquad I_3 = f(U)$$

Ahora bien, la corriente total que conduce el electrodo conjunto a tierra es la suma de las 3 corrientes individuales de los anillos:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = f(U)$$

o sea I es igual a una constante (M) multiplicada por la magnitud del potencial del electrodo (U):

$$I = M \cdot U$$

de donde la resistencia del electrodo conjunto será:

$$R = U/I = 1/M$$

II.2.2.b.2.- Electrodo semiesférico y anular combinados:

Si

alrededor de una torre se instala un electrodo anular de puesta a tierra, con el objeto de controlar el potencial, éste y la base de anclaje de la torre, si ésta está sujeta

con sus cuatro puntos de anclaje a un solo bloque de fundamento, constituyen muy aproximadamente una combinación de electrodos anular y esférico, ya que la base de la torre en estas condiciones puede considerarse como un electrodo semiesférico, cuyo diámetro equivalente es:

$$D_1 = 1.2 b$$

siendo b la distancia entre los puntos de anclaje.

Igual que en el caso de anillos concéntricos, el potencial en un punto cualquiera, viene determinado por la acción conjunta de los dos electrodos.

Considerando primeramente por separado el electrodo semiesférico, el potencial ocasionado por éste a una distancia " Z " desde su centro, considerando también su imagen, según la Ec. 2.5, será:

$$U_Z = \frac{2 \rho I_1}{4 \pi Z}$$

siendo I_1 la corriente que conduce a tierra el electrodo semiesférico y $2I_1$ la corriente total incluida la de su imagen (Fig. 2.23).

De la Fig. 2.23, se puede obtener el valor de Z , así:

$$Z = (D_1/2) \cdot \sqrt{p_s^2 + q_s^2}$$

con lo que:

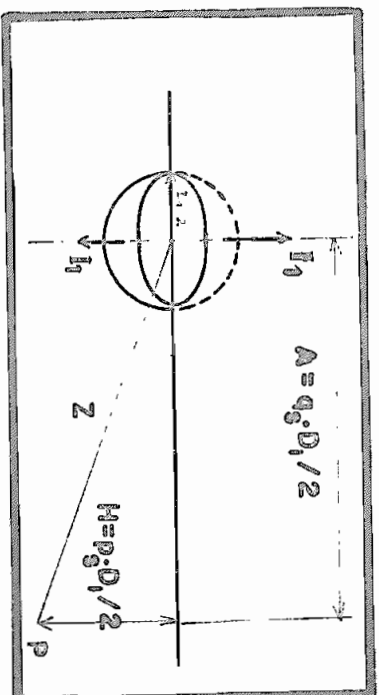


Fig. 2.23. — Electrodo semiesférico considerado por separado

$$U_Z = (2 \cdot I_0 \cdot \rho) / (2\pi D_1 \cdot \sqrt{p_g^2 + q_g^2}) = 2 \cdot I_0 \cdot N_1 \cdot K_{1g}$$

siendo:

$$N_1 = \rho / 2 \cdot \pi \cdot D_1$$

$$K_{1g} = 1 / \sqrt{p_g^2 + q_g^2}$$

Mc. 2.26

para un determinado punto P, se puede determinar su K_{1g} , conociendo su "p_g" y su "q_g". Para la superficie del electrodo se tiene: p_g=0 y q_g = 1, por lo tanto:

$$K_{11} = 1 / \sqrt{0^2 + 1^2} = 1 \quad \text{Mc. 2.27}$$

Considerando la acción conjunta de los dos electrodos se tiene la disposición indicada en la Fig. 2.24. El anillo para control del potencial está enterrado a una profundidad

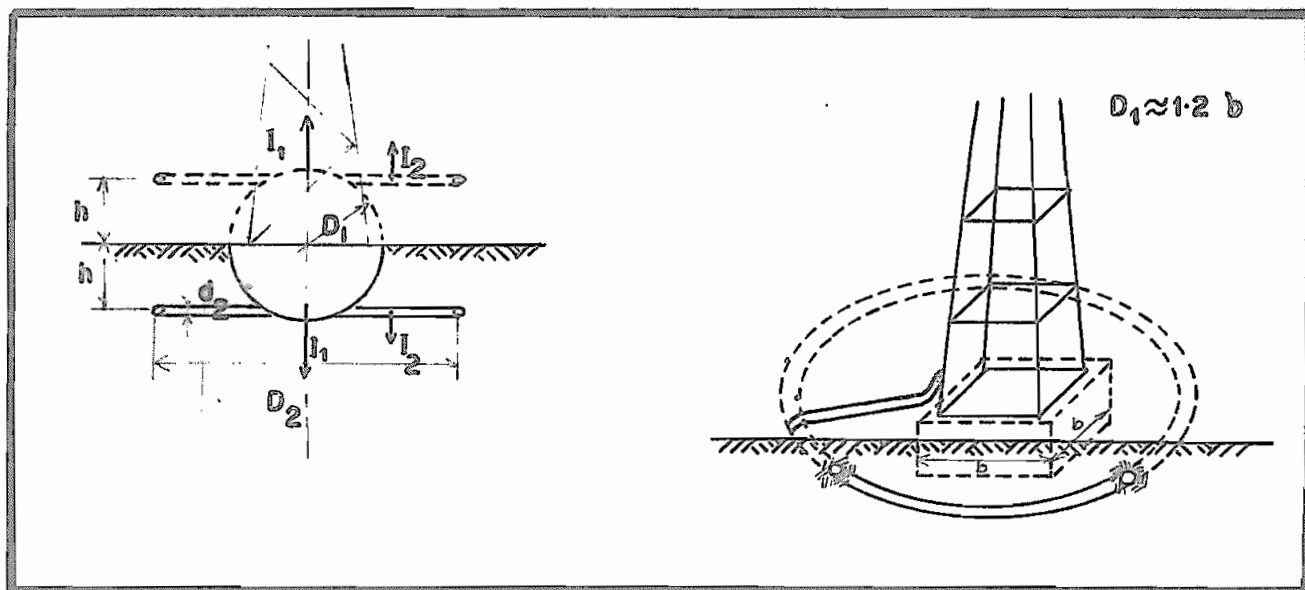


Fig. 2.24.- Electrodo semiesférico y anular combinados y sus imágenes y su símil práctico.

"h", siendo su diámetro D_2 y el diámetro de su sección d_2 .

Puesto que el anillo está unido conductivamente con la torre, se tiene que el potencial de la base de la torre, o sea el del electrodo semicircular y el del electrodo anular son iguales.

Si I_1 es la corriente que conduce a tierra el electrodo semiesférico e I_2 es la que conduce el electrodo anular, se tendrá que el potencial de cada uno de los electrodos estará influenciado por su propio potencial y el ocasionado -

por su imagen y el potencial ocasionado por el otro electrodo y su imagen. Así:

a.- Potencial de la Semiesfera:

1.- Su propio potencial y el de su imagen:

Es como si se tratara de una esfera que conduce la corriente $2I_1$, y por lo tanto éste potencial es:

$$U_{11} + U'_{11} = 2 \cdot I_1 \cdot \frac{\rho}{2\pi D_1} \cdot K_{11} = 2 \cdot I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11}$$

siendo $K_{11}=1$, según la Ec. 2.27.

2.- Potencial originado por el anillo sobre la semiesfera:

Hay que pensar en el potencial originado en el centro de la semiesfera. Según la Ec. 2.15, se tiene que:

$$U_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_2} \cdot K_{21}$$

siendo K_{21} de obtenerse de las curvas de la Fig. 2.11 y según el gráfico de la Fig. 2.25, para $q=0$ y $p=\phi h)/(D_2/2)$.

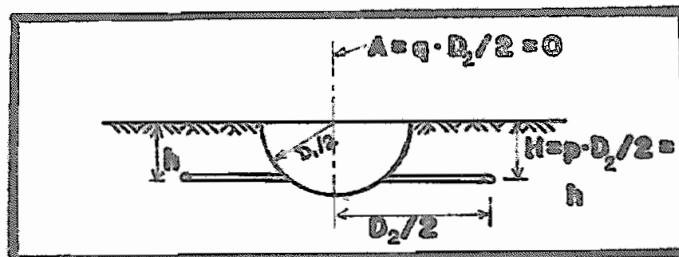


Fig. 2.25.- Electrodo anular y semiesférico.

3.- Potencial ocasionado por la imagen del anillo sobre la semiesfera:

Por simetría, se deduce que:

$$U'_{21} = U'_{21} \quad ; \quad \text{o sea:} \quad K'_{21} = K_{21}$$

El potencial total de la semiesfera será:

$$U = U_{11} + U'_{11} + U_{21} + U'_{21}$$

$$U = 2I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11} + 2I_2 \cdot N_2 \cdot K_{21}$$

b.- Potencial del Anillo:

1.- Su propio potencial:

Según la Ec. 2.15, se tiene:

$$U_{22} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_2} \cdot K_{22} = I_2 \cdot N_2 \cdot K_{22}$$

debiendo K_{22} , obtenerse de las curvas de la Fig. 2.13, para la relación D_2/d_2 .

2.- Potencial originado por su imagen:

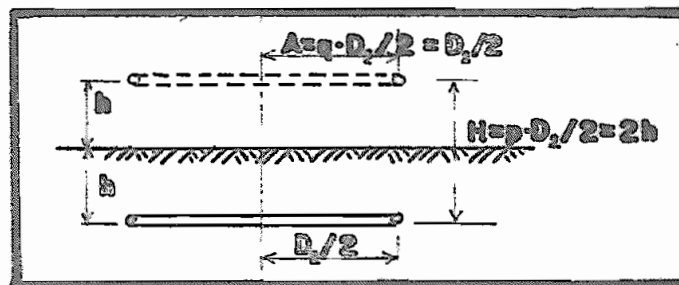


Fig. 2.26.- Electrodo anular y su imagen.

$$U'_{12} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi^2 D_2} \cdot K'_{22} = I_2 \cdot N_2 \cdot K_{22}$$

debiendo obtenerse K'_{22} de las curvas de la Fig. 2.11, según los parámetros deducidos de la Fig. 2.26, que son:

$$q = 1$$

$$p = (2h)/(D_2/2)$$

3.- Potencial ocasionado por la semiesfera y su imagen sobre el anillo:

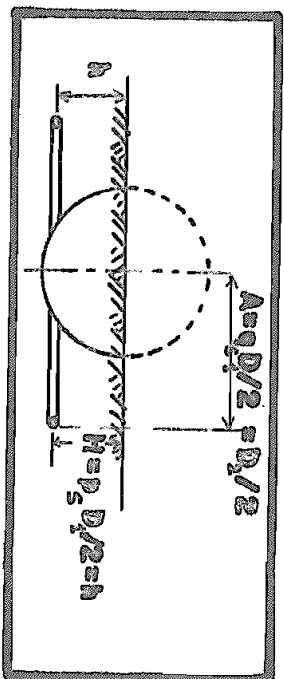


Fig. 2.27.- Electrodo anular y electrodo semiesférico y su imagen.

$$U_{12} + U'_{12} = 2 \cdot I_1 \cdot \frac{\rho}{2\pi D_1} \cdot K_{12} = 2I_1 \cdot N_1 \cdot K_{12}$$

siendo:

$$K_{12} = 1/\sqrt{p_s^2 + q_s^2}$$

y de la Fig. 2.27:

$$p_s = \rho h / (D_1/2)$$

$$q_s = D_2/D_1$$

y el potencial total del anillo será:

$$U = U_{22} + U'_{22} + U_{12} + U'_{12}$$

$$U = I_2 \cdot N_2 \cdot K_{22} + I_2 \cdot N_2 \cdot K'_{22} + 2I_1 \cdot N_1 \cdot K_{12}$$

$$U = 2I_1 \cdot N_1 \cdot K_{12} + I_2 \cdot N_2 \cdot (K_{22} + K'_{22})$$

o sea que se tienen dos ecuaciones (una para cada electrodo):

$$U = 2I_1 \cdot N_1 \cdot K_{11} + 2I_2 \cdot N_2 \cdot K_{21} \quad \text{Semiesfera}$$

$$U = 2I_1 \cdot N_1 \cdot K_{12} + I_2 \cdot N_2 \cdot (K_{22} + K'_{22}) \quad \text{Anillo}$$

resolviendo éste sistema, se llega a obtener los valores de las corrientes I_1 e I_2 , como función del potencial del electrodo U_0

$$I_1 = f(U) \quad I_2 = f(U)$$

La corriente total que conduce a tierra el electrodo combinado (I), es la suma de I_1 e I_2 , y a su vez es una función de U ; o sea es igual a una constante "C" multiplicada por U

$$I = I_1 + I_2 = C \cdot U$$

La resistencia del electrodo combinado, será:

$$R = U/I = 1/C$$

II.2.2.b.3.- Electrodo anular y barra tubular combinados:

Es-

te caso, se presenta por ejemplo cunado en una torre de transmisión, además de un electrodo de puesta a tierra tubular vertical, se instala un anillo alrededor, para control del potencial, como se ilustra en la Fig. 2.28.

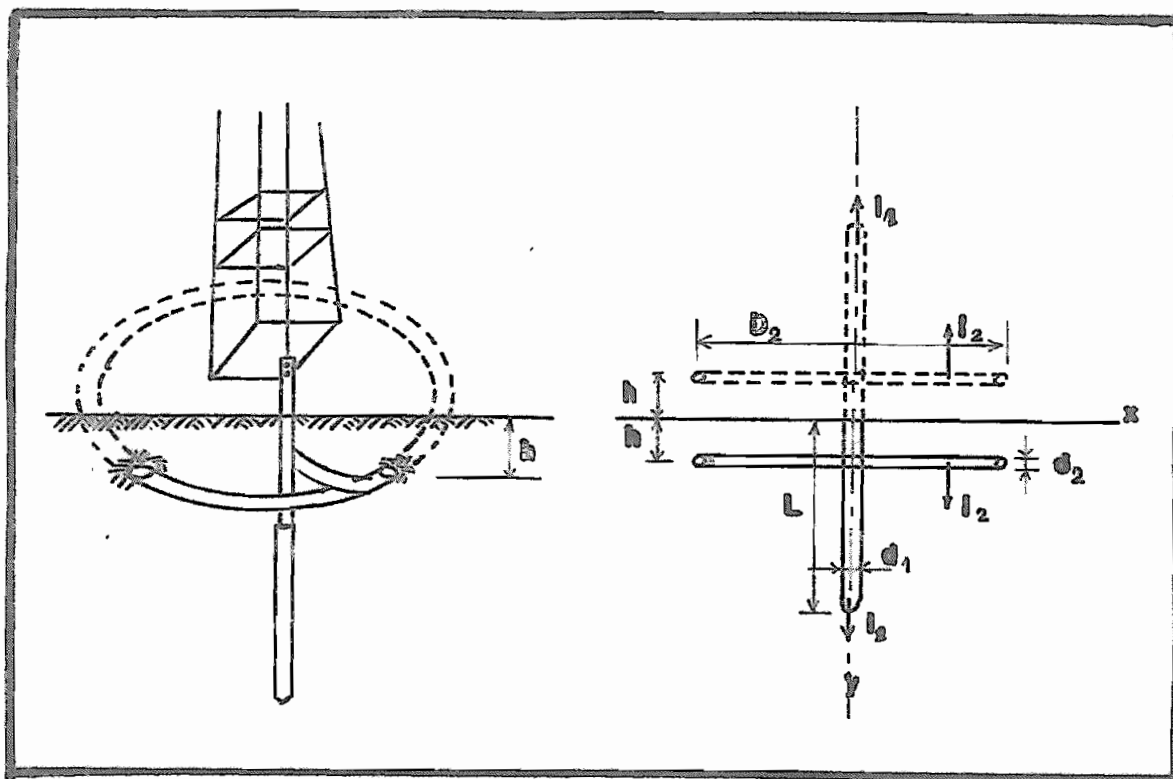


Fig. 2.28.- Electrodo anular y tubular combinados y sus imágenes.

En éste caso también el anillo y la barra, están al mismo potencial, siendo el potencial de cada electrodo la suma de su propio potencial, más el ocasionado por su pro -

pia imagen y el ocasionado por el otro electrodo y su imagen.

Si se denómina:

I_1 = corriente que conduce a tierra el electrodo tubular.

I_2 = corriente que conduce a tierra el anillo.

L = longitud del electrodo tubular.

D_2 = diámetro del anillo.

d_1 = diámetro de la sección del electrodo tubular.

d_2 = diámetro de la sección del electrodo anular (se toma d_2 como la mitad del ancho en caso de bandas)

h = profundidad de instalación del electrodo anular.

los respectivos potenciales serán:

a.- Potencial en el electrodo tubular:

1.- Potencial propio y el ocasionado por su imagen:

Par

tiendo de la Ec. 2.11, se obtiene:

$$U_{11} + U'_{11} = 2I_1 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{4L}{d_1}$$

2.- Potencial ocasionado por el anillo sobre la barra:

Cada elemento del anillo (dL) ocasiona sobre el electrodo tubular un potencial:

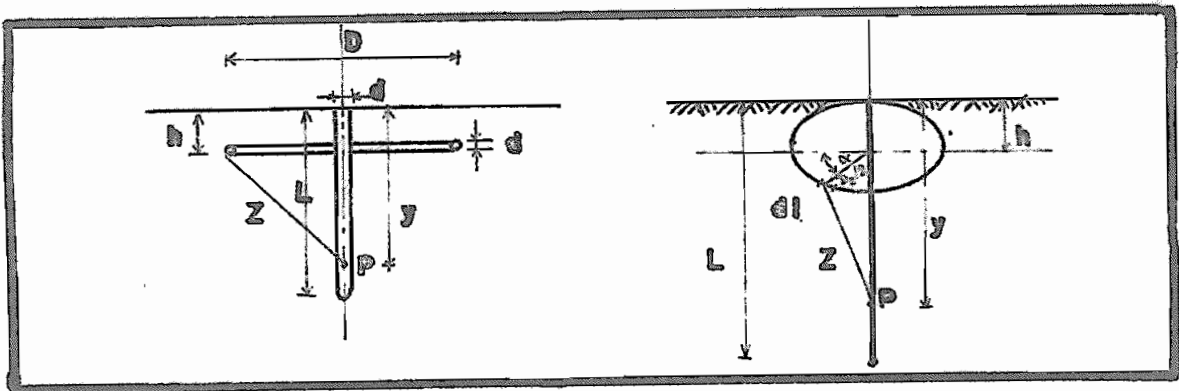


Fig. 2.29.- Electrodo anular y tubular.

$$dU_P = I_2 \cdot \frac{dl}{\pi D_2} \cdot \frac{\rho}{4\pi Z}$$

siendo:

$$dl = \frac{D_2}{2} \cdot d\alpha \quad \text{y} \quad Z = \sqrt{(D_2/2)^2 + (y-h)^2}$$

y por lo tanto:

$$dU_P = I_2 \cdot \frac{\rho}{8\pi^2 Z} \cdot d\alpha$$

el potencial ocasionado por todos los elementos del anillo sobre un punto P del electrodo tubular, será:

$$U_P = I_2 \cdot \frac{\rho}{8\pi^2 Z} \cdot \int_0^{2\pi} d\alpha = I_2 \cdot \frac{2\pi \cdot \rho}{8\pi^2 Z} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi Z}$$

En realidad éste es el potencial que se originaría en todos los puntos P situados en el eje del anillo, que de no existir el electrodo tubular en ese sitio serían diferentes

unos a otros, pero al estar el tubo en esa ubicación éste constituye una unión conductora entre los puntos mencionados de tal forma que el potencial será igual a lo largo del electrodo tubular, siendo este potencial (el ocasionado por el anillo) un potencial medio que se calcula por integración de todos los U_p a lo largo de la barra y dividiendo el resultado de la integración para el largo total "L" de la barra; así:

$$U_{22} = 1/L \cdot \int_{-L}^0 U_p \cdot dy$$

$$U_{21} = \frac{1}{L} \cdot I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi} \cdot \int_{-L}^0 \frac{dy}{Z}$$

$$U_{21} = \frac{1}{L} \cdot I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi} \cdot \int_{-L}^0 \frac{1}{\sqrt{(y-h)^2 + (D_2/2)^2}} \cdot dy$$

$$U_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{\sqrt{h^2 + (D_2/2)^2} - h}{\sqrt{(L+h)^2 + (D_2/2)^2} - L - h}$$

3.- Potencial ocasionado por la imagen del anillo sobre el electrodo tubular:

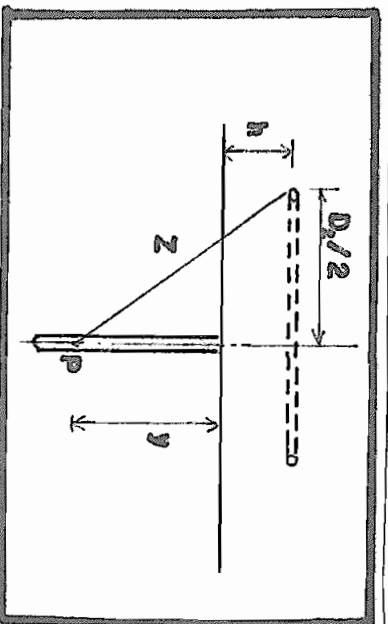


Fig. 2.30.- Electrodo tubular y la imagen del electrodo anular.

Los razonamientos son similares que para el caso del anillo:

$$dU_p = I_2 \cdot \frac{dl}{\pi D_2} \cdot \frac{\rho}{4\pi Z}$$

siendo:

$$Z = \sqrt{(y+h)^2 + (D_2/2)^2}$$

$$dl = (D_2/2) \cdot d\alpha$$

se tiene:

$$dU_p = I_2 \cdot \frac{\rho}{8\pi^2 Z} \cdot d\alpha$$

$$U_p = \int_0^{2\pi} I_2 \cdot \frac{\rho}{8\pi^2 Z} \cdot d\alpha = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi Z}$$

$$U'_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \int_0^L \frac{dy}{\sqrt{(y+h)^2 + (D_2/2)^2}}$$

$$U'_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{\sqrt{(L+h)^2 + (D_2/2)^2} + L + h}{\sqrt{h^2 + (D_2/2)^2} + h}$$

de donde:

$$U_{21} + U'_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{(\sqrt{h^2 + (D_2/2)^2} - h)(\sqrt{(L+h)^2 + (D_2/2)^2} + L + h)}{(\sqrt{h^2 + (D_2/2)^2} + h)(\sqrt{(L+h)^2 + (D_2/2)^2} - L - h)}$$

Para el caso particular en que el anillo esté en la su

perficie del suelo, o sea para $h=0$, se tiene:

$$U_{21} + U'_{21} = I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{\sqrt{(D_2/2)^2 + L^2} + L}{\sqrt{(D_2/2)^2 + L^2} - L}$$

y el potencial total del electrodo tubular es:

$$U = U_{11} + U'_{11} + U_{21} + U'_{21}$$

$$U = 2I_1 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{4L}{d_1} + I_2 \cdot \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{\sqrt{(D_2/2)^2 + L^2} + L}{\sqrt{(D_2/2)^2 + L^2} - L}$$

b.-> Potencial del anillo:

1.-> Potencial y el de su imagen:

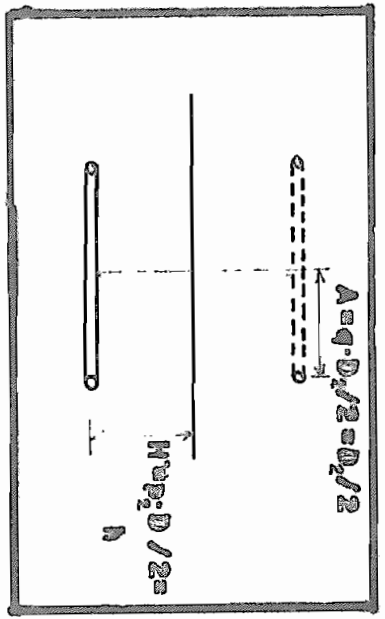


Fig. 2.51.-> Electrodo anular y su imagen.

$$U_{22} + U'_{22} = I_2 \cdot N_2 \cdot (K_{22} + K'_{22})$$

siendo:

$$N_2 = \rho/4\pi^2 D_2$$

y debiendo obtenerse K_{22} de las curvas de la Fig. 2.13, para una relación D_2/d_2 y el valor de K'_{22} de las curvas de la Fig. 2.11 para los parámetros que se pueden deducir de la Fig. 2.51 y que son:

$$q = 1 \quad p = h/(D_2/2)$$

2.- Potencial ocasionado por el electrodo tubular y su imagen:

Según la Ec. 2.10, se tiene que para:

$$x = D_2/2 \quad y = h$$

$$U_{12} + U'_{12} = 2I_1 \rho \frac{1}{8\pi L} \ln \frac{\sqrt{(D_2/2)^2 + (h+L)^2} + h + L}{\sqrt{(D_2/2)^2 + (h+L)^2} + h - L}$$

y el potencial total del anillo será:

$$U = U_{22} + U'_{22} + U_{12} + U'_{12}$$

$$U = I_2 \cdot N_2 \cdot (K_{22} + K'_{22}) + 2I_1 \rho \frac{1}{8\pi L} \ln \frac{\sqrt{(D_2/2)^2 + (h+L)^2} + h + L}{\sqrt{(D_2/2)^2 + (h+L)^2} + h - L}$$

y para el caso particular de $h=0$:

$$U = I_2 \cdot N_2 \cdot (K_{22} + K'_{22}) + 2I_1 \rho \frac{1}{8\pi L} \ln \frac{\sqrt{(D_2/2)^2} + L^2}{\sqrt{(D_2/2)^2} + L^2} + L - L$$

Puesto que los dos electrodos están unidos entre sí, el potencial del anillo es igual al de la barra tubular, obteniéndose así un sistema de dos ecuaciones, de las cuales, se puede resolver los valores de I_1 e I_2 , ambos como función de U ; a su vez la corriente total que conduce a tierra el electrodo conjunto (I), que es la suma de I_1 e I_2 será función de U , más claramente será igual a una constante (Q) multiplicada por U .

$$I = I_1 + I_2 = Q \cdot U$$

de donde la resistencia del electrodo conjunto será:

$$R = U/I = 1/Q$$

II. 2. 2. b. 4. -- Electrodos de cuatro radios:

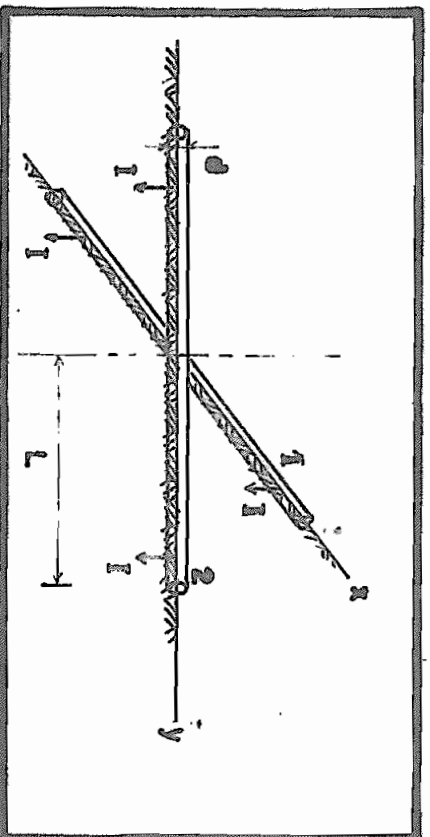


Fig. 2. 32. -- Electrodo de cuatro radios.

Este tipo de electrodo, es usado especialmente para la protección de torres contra descargas atmosféricas. Se considerará primero el caso de que el electrodo, esté en la superficie del suelo.

Si la longitud de cada brazo es L y la corriente que éste conduce a tierra es I y además considerando que cada uno de los brazos forman una barra de longitud $2L$, los potenciales de cada una de éstas barras serán:

a.- Potencial de la barra "1":

1.- Su propio potencial:

Si el electrodo estuviera íntegramente rodeado por dos semiregiones de tierra se puede calcular su propio potencial según la Ec. 2.13, considerando que en tal ecuación se consideraba una longitud total de la barra igual a L y en este caso es $2L$; por lo tanto:

$$U_{11} = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot 2 \ln \frac{4L}{d}$$

2.- Potencial ocasionado por la barra "2" sobre la "1":

Según la Fig. 2.33, cada elemento de la barra 2 obriga, en un punto P situado en una recta perpendicular a ella o sea en la dirección de la barra 1, un potencial:

$$dU_P = I' \cdot \frac{\rho}{4\pi Z}$$

esto según la Ec. 2.5, siendo I' la corriente con que apor-

ta cada elemento $d1$ de la barra 2 para la formación del potencial en la barra 1, o sea :

$$I' = 2I_0 \frac{d1}{2L}$$

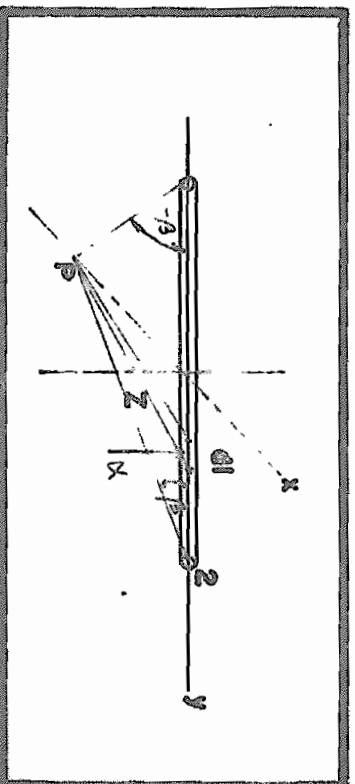


Fig. 2,33.- Potencial ocasionado por la barra "2" sobre la barra "1".

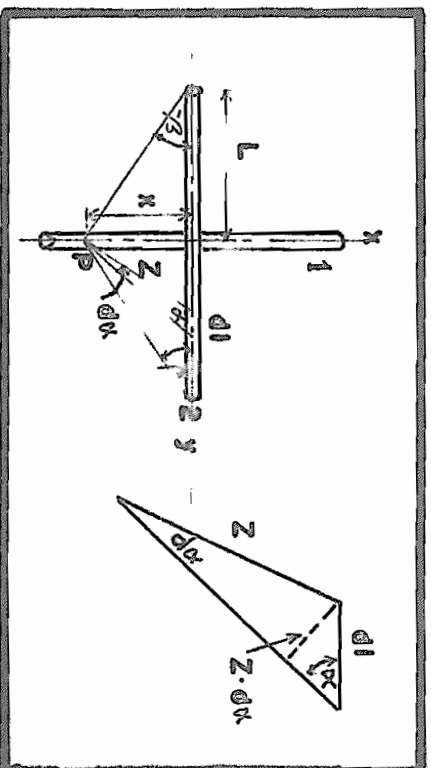


Fig. 2,34.- Vista en planta del electrodo de 4 radios.

Luego:

$$dU_P = 2I_0 \frac{dl}{2R} \cdot \frac{\rho}{4\pi R^2}$$

de la Fig. 2.34, se deduce que:

$$dl = Z \cdot dx / \operatorname{sen} \kappa$$

de donde:

$$dU_P = 2I_0 \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \frac{dx}{\operatorname{sen} \kappa}$$

$$U_P = 2I_0 \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \int_{\beta/2}^{-\beta/2} dx / \operatorname{sen} \kappa = 2I_0 \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot 2 \ln \cot \frac{\beta}{2}$$

Si se integra éste potencial a lo largo de todos los puntos P sobre el eje x y se divide por la longitud total del electrodo, se obtiene el potencial medio ocasionado por la barra 2 sobre la 1. (Se pueden tomar como límites de integración O y L y dividir el resultado para L, que es lo mismo que tomar los límites -L y +L y dividir el resultado para 2L). O sea:

$$U_{21} = 2I_0 \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \frac{2}{L} \int_0^L \ln \cot \frac{\beta}{2} \cdot dx$$

por otra parte:

$$\cot \frac{\beta}{2} = \frac{L}{x/2} = 2L/x$$

y por lo tanto:

$$U_{21} = 2I_1 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \frac{2}{L} \int_0^L \ln \frac{2L}{x} dx$$

$$U_{21} = 2I_1 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot 2(\ln 2 + 1)$$

$$U_{21} = 2I_1 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot 3,4$$

Ec. 2.28

Entonces el potencial total del electrodo 1 será:

$$U = U_{11} + U_{21} = 2I_1 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot (2 \ln \frac{4L}{d} + 3,4)$$

b.- Potencial de la barra "2":

Puesto que los dos electrodos-

están unidos entre sí, el potencial de la barra 2 es igual al de la barra 1.

Resistencia del electrodo combinado:

La corriente total que

el electrodo conduce a tierra es $4I$, por lo tanto la resistencia del mismo bajo la suposición mantenida hasta el momento de que está íntegramente rodeado de tierra, será:

$$R = U/4I = \frac{\rho}{16\pi L} \cdot (2 \ln \frac{4L}{d} + 3,4)$$

pero como el electrodo está en la superficie R es el doble:

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \cdot (\ln \frac{4L}{d} + 1,7)$$

Ec. 2.29

Electrodo de 4 radios enterrado a una profundidad "h" :

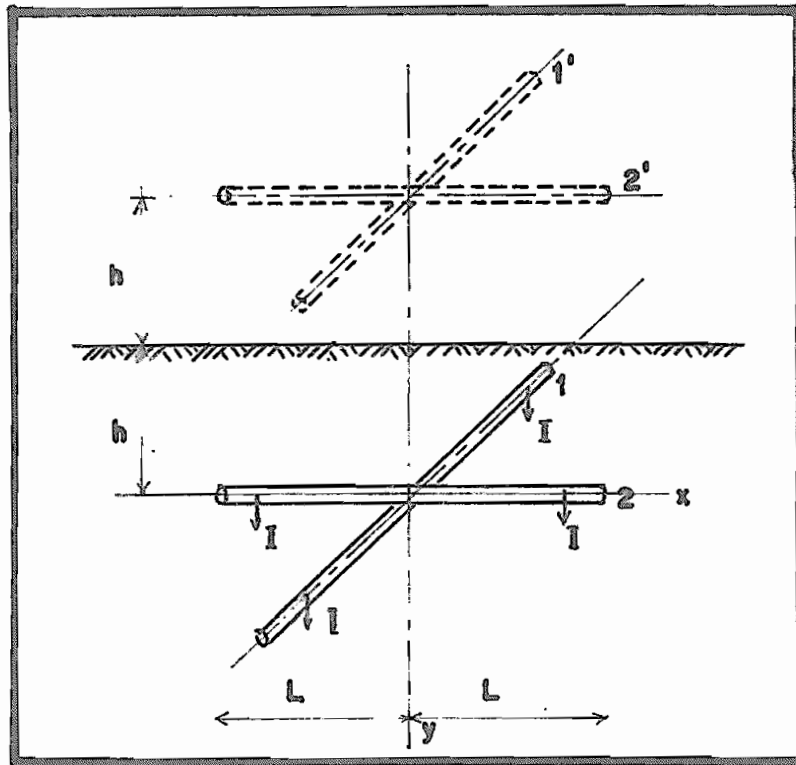


Fig. 2.35.- Electrodo de 4 radios enterrado y su imagen.

Considérese una cualquiera de las barras, con el fin - de calcular su potencial, sea por ejemplo la barra "1":

1.- Su propio potencial:

Según la Ec. 2.13.a:

$$U_{11} = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot 2 \ln \frac{4L}{d}$$

2.- El potencial ocasionado por su imagen:

De acuerdo a

la Ec. 2.13 y considerando que en aquella la longitud del-

electrodo es L , mientras que en el presente caso es $2L$, el potencial ocasionado por la imagen en un punto $P(x, y)$ es:

$$U = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} * \ln \frac{x + L + \sqrt{(x+L)^2 + y^2}}{x - L + \sqrt{(x-L)^2 + y^2}}$$

y el potencial en el centro del electrodo 1, o sea para:

$$x = 0 \quad y = 2h$$

será:

$$U'_{11} = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} * \ln \frac{\sqrt{4h^2 + L^2} + L}{\sqrt{4h^2 + L^2} - L}$$

5.- Potencial ocasionado por barra "2" sobre la "1":

Según

la Hc. 2.28 se tiene:

$$U_{21} = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} * 3,4$$

4.- Potencial ocasionado por la imagen de la barra "2" sobre la barra "1":

El potencial ocasionado por un elemento dl de la imagen de la barra 2 sobre la 1, se puede deducir con ayuda de la Fig. 2.36. En un punto P de la barra 1 el potencial ocasionado por dl , según la Hc. 2.5, es:

$$dU_P = I' * \frac{\rho}{4\pi Z}$$

siendo I' el aporte de corriente del elemento dl y Z la dis-

tancia desde el elemento $d1$ hasta el punto P . O sea:

$$d1 = Z \cdot dx / \operatorname{sen} \alpha \quad \text{de la Fig. 2.36}$$

$$I' = 2I \cdot d1/2L$$

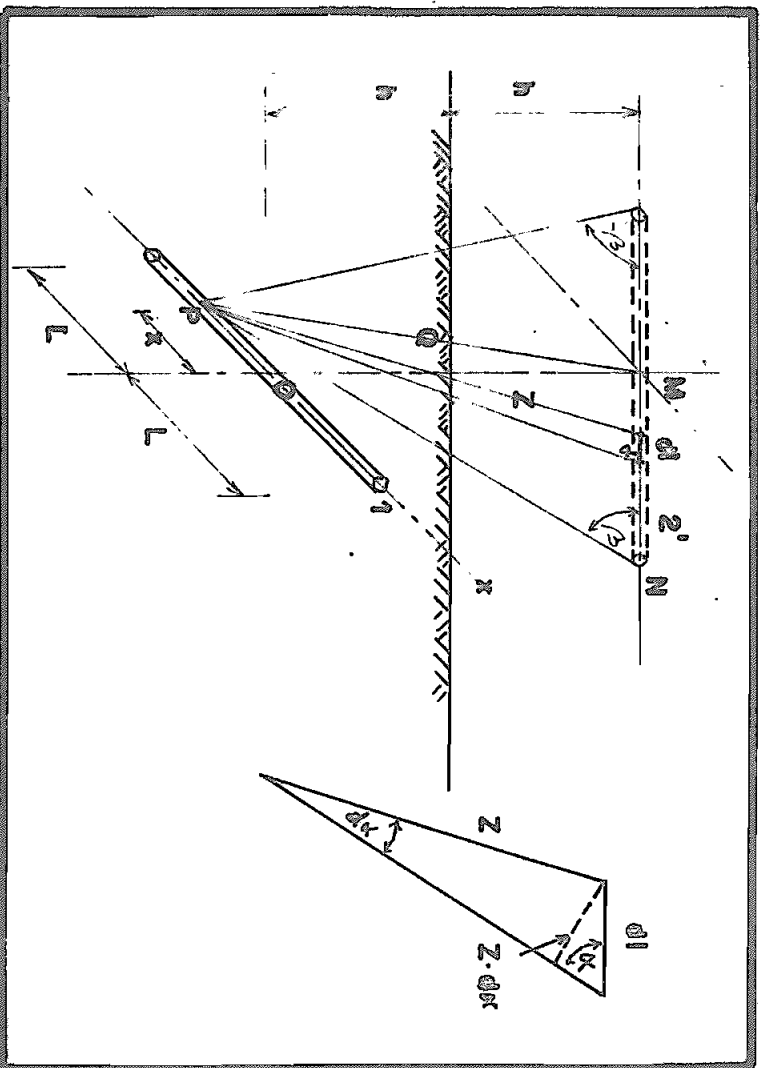


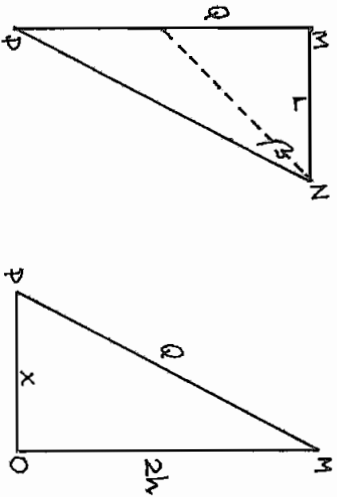
Fig. 2.36.- Barra 1 y la imagen de la barra 2.

con lo que:

$$dU_P = 2I \cdot \frac{d1}{2L} \cdot \frac{\rho}{4\pi Z} = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \frac{dx}{\operatorname{sen} \alpha}$$

$$U_P = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \int_{-\beta}^{\beta} \frac{dx}{\operatorname{sen} \alpha} = 2I \cdot \frac{\rho}{8\pi L} \cdot 2 \ln \cot \frac{\beta}{2}$$

Para obtener el valor de $\cot \beta/2$ se observará el siguiente gráfico:



con lo que:

$$\cot \frac{\beta}{2} \approx \frac{L}{Q/2} = 2L/Q$$

$$Q = \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

$$\cot \frac{\beta}{2} = 2L / \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

$$U_p = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} \ln \frac{2L}{\sqrt{x^2 + 4h^2}}$$

Con el fin de obtener el potencial medio sobre la barra 1 ocasionado por la imagen, de 2, habrá que integrar U_p a lo largo de x y dividir para la longitud del electrodo, o sea hay que hacer la misma consideración que se hizo en el caso del electrodo instalado en la superficie del suelo:

$$U'_{21} = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \frac{2}{L} \int_0^L \ln \frac{2L}{\sqrt{x^2 + 4h^2}} \cdot dx$$

$$U'_{21} = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \left[2 \ln \frac{2L}{\sqrt{L^2 + 4h^2}} + 2 - \frac{4h}{L} \operatorname{arc} \tan \frac{L}{2h} \right]$$

El potencial total de la barra 1 será:

$$U = U_{11} + U'_{11} + U_{21} + U'_{21}$$

o sea:

$$U = 2I_0 \frac{\rho}{8\pi L} \left[2 \ln \frac{4L}{d} + \ln \frac{\sqrt{4h^2 + L^2} + L}{\sqrt{4h^2 + L^2} - L} + 5,4 + \right. \\ \left. + 2 \ln \frac{2L}{\sqrt{L^2 + 4h^2}} + 2 - \frac{4h}{L} \operatorname{arc} \tan \frac{L}{2h} \right]$$

este potencial será igual al de la barra 2, ya que están unidos entre sí.

La corriente que conduce a tierra el electrodo de cuatro radios es $4I_1$, por lo tanto su resistencia es:

$$R = U/4I = \frac{\rho}{16\pi L} \left[2 \ln \frac{4L}{d} + \ln \frac{\sqrt{4h^2 + L^2} + L}{\sqrt{4h^2 + L^2} - L} + 5,4 + \right. \\ \left. + 2 \ln \frac{2L}{L^2 + 4h^2} + \frac{4h}{L} \operatorname{arc} \tan \frac{L}{2h} \right]$$

(Ec. 2.30)

II.2.3.- Hilo de Guarda:

Los hilos de guarda, tienen por lo general una resistencia y una inductancia, que en la mayoría de los casos no se pueden despreciar.

Supóngase una serie de torres de transmisión unidas por un hilo de guarda, se va a calcular la resistencia de puesta a tierra de esta serie de torres, cuando la alimentación de corriente (I) al hilo de guarda, ocurre al comienzo de dicha serie de torres. Se supone primero que el hilo de guarda tiene solamente componente resistiva, despreciando por lo tanto su inductancia, lo cual se cumple muy aproximadamente en hilos de acero.

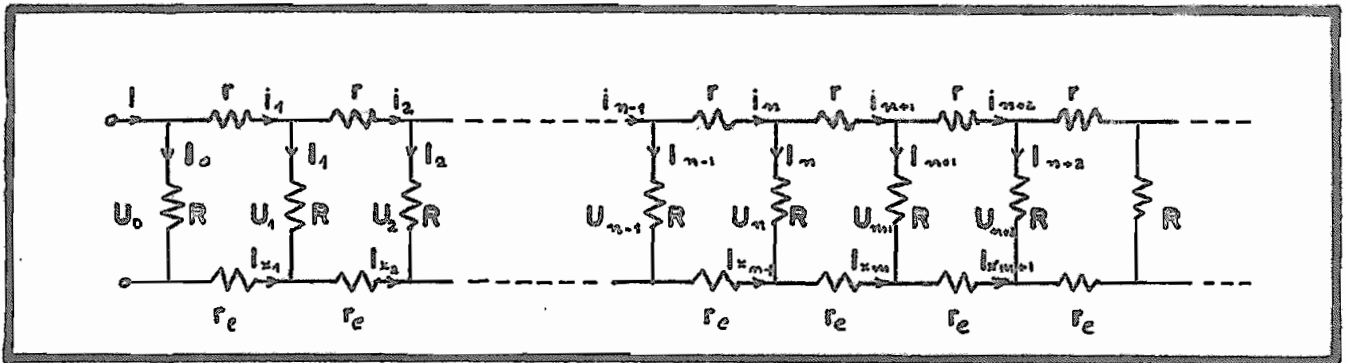


Fig. 2.37.- Circuito equivalente de una serie de torres de transmisión unidas por un hilo de guarda.

En este diagrama significan:

U_0 = Potencial de la primera torre de la serie.

U_n = Potencial de la enésima torre.

r = Resistencia del hilo de guarda en la longitud de un vano. (Entre dos torres).

r_e = Resistencia del suelo entre dos torres.

R = Resistencia de puesta a tierra de una torre, con el hilo de guarda levantado.

i_n = Corriente en el tramo n del hilo de guarda.

I_n = Corriente en la n ésima torre.

I_{X_n} = Corriente que atravieza r_e en el tramo posterior a la n ésima torre $= \sum_{m=0}^{m=n-1} I_m$

El potencial de la n ésima torre es:

$$U_n = I_n R$$

La diferencia de corrientes entre los tramos " n " y " $n+1$ " del hilo de guarda es:

$$i_n - i_{n+1} = I_n$$

En la malla formada por la torre " $n-1$ ", la resistencia del hilo r , la torre " n " y la resistencia del suelo r_e , se tiene la siguiente ecuación de voltajes:

$$U_{n-1} - i_n r + I_{X_{n-1}} = 0$$

$$U_{n-1} = i_n \cdot r + U_n - I_{X_{n-1}} \cdot r_e$$

$$U_{n-1} - U_n = i_n \cdot r - r_e \cdot \sum_{m=0}^{m=n-1} I_m$$

$$U_{n-1} - U_n = i_n \cdot r - r_e (I_0 + I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1})$$

por otra parte se tiene:

$$I_0 = I - i_1$$

$$I_1 = i_1 - i_0$$

$$I_0 + I_1 = I - i_2$$

$$I_2 = i_2 - i_3$$

$$I_0 + I_1 + I_2 = I - i_3$$

•

•

•

•

$$I_0 + I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1} = I - i_n$$

por lo tanto:

$$U_{n-1} - U_n = i_n \cdot r - r_e \cdot (I - i_n)$$

Ec. 2.31

y en la siguiente malla se tiene:

$$U_n - U_{n+1} = i_{n+1} (r + r_e) - I_e r_e \quad \text{Ec. 2.32}$$

restando las dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1} = (i_n - i_{n+1})(r + r_e) = I_n (r + r_e)$$

$$U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1} = U_n \frac{r + r_e}{R} \quad \text{Ec. 2.33}$$

En una serie larga de torres, el potencial de una torre muy alejada es prácticamente cero, o sea que U_n se puede aproximar a:

$$U_n = U_0 e^{-Kn}$$

y la ec. 2.33 puede escribirse:

$$U_0 e^{-K(n-1)} - 2U_0 e^{-Kn} + U_0 e^{-K(n+1)} = U_0 + \frac{r + r_e}{R} e^{-Kn}$$

$$e^{-K(n-1)} + e^{-Kn} = \frac{r + r_e}{R} = (2 \operatorname{Senh} \frac{K}{2})^2$$

para: $r \ll R$: $\operatorname{Senh} K/2 = K/2$

de donde:

$$K = \sqrt{\frac{r + r_e}{R}} \quad \text{Ec. 2.34}$$

Para $n=1$:

$$U_0 - U_1 = I_1 (r + r_e) - I_e r_e$$

$$U_0 (1 - e^{-N}) = i_1 (r_1 + r_e) - I_0 r_e$$

$$I_0 r_e (1 - e^{-N}) = i_1 (r_1 + r_e) - I_0 r_e$$

y considerando que : $I_0 = I - i_1$, se llega a:

$$i_1 = I_0 \frac{1 - e^{-N} + \frac{r_e}{R}}{1 - e^{-N} + \frac{r_1 + r_e}{R}}$$

que es la corriente que cálcula por el primer tramo del hilo de guarda. El potencial U_0 de la primera torre será:

$$U_0 = I_0 r_e = (I - i_1) r_e$$

y reemplazando el valor de i_1 , se llega a:

$$U_0 = I_0 \frac{r_e}{1 - e^{-N} + \frac{r_e + r_1}{R}} \quad \text{Ec. 2.35}$$

La resistencia de la serie, sin considerar la primera torre será:

$$R' = U_0 / i_1 = \frac{r_e}{1 - e^{-N} + \frac{r_e}{R}} \quad \text{Ec. 2.36}$$

y considerando la resistencia de la primera torre:

$$R = U_0 / I = \frac{r}{1 - e^{-\alpha} + \frac{r + Re}{R}}$$

Ec. 2.37

II.2.3.a.- Consideración de La Inductividad:

Puesto que algunos casos la componente inductiva del hilo de guarda puede llegar a tener valores del mismo orden que la componente resistiva, vale la pena hacer una consideración de la misma.

Siguiendo un procedimiento similar al anterior se llega a determinar que el valor de la impedancia de la serie de torres, sin considerar la primera torre es:

$$Z' = U_0 / I = \frac{r + j\omega(L - M)}{1 - e^{-\alpha} \cos \beta + \frac{Re}{r} + j(\bar{\alpha} - \alpha \cos \beta + \frac{\omega M}{r})}$$

Ec. 2.38

Siendo:

$\omega = 2\pi f$ = frecuencia angular del sistema.

L = inductividad de un tramo del hilo de guarda (longitud media del vano).

M = autoinductancia entre el hilo de guarda y un conductor de fase de la línea, en la longitud de un vano.

$$\alpha = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}$$

Ec. 2.39

$$\beta = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2} - a} \quad \text{Ec. 2.40}$$

$$a = \frac{r + r_e}{R} \quad \text{Ec. 2.41}$$

$$b = \frac{\omega L}{R} \quad \text{Ec. 2.42}$$

Los demás parámetros conservan el mismo significado que en la deducción anterior. A su vez los parámetros L, M y r_e , se calculan de la siguiente manera:

$$L = 0.2 \left(\ln \frac{2h}{d} + 0.25/\mu \right) \cdot 10^{-3} \text{ H/Km.} \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$M = 0.2 \left(\ln \frac{h}{d_m} \right) \cdot 10^{-3} \text{ H/Km.} \quad \text{Ec. 2.44}$$

$$r_e = 0.1 \frac{\omega \cdot \Pi}{2} \cdot 10^{-3} \text{ ohmios/Km.} \quad \text{Ec. 2.45}$$

Siendo:

$$h = \frac{0.0185}{\sqrt{\mu_r k \cdot 2\pi f}} \text{ metros} \quad \text{Ec. 2.46}$$

$$d_m = \sqrt[3]{d_{13} \cdot d_{23} \cdot d_{33}} = \text{distancia media entre el hilo de guarda y los 3 conductores de fase.} \quad \text{Ec. 2.47}$$

$$\mu_o = 1.26 \times 10^{-8} \text{ H/cm.}$$

k = conductividad del suelo en 10^{-6} mhos/cm.

d = diámetro del hilo de guarda en metros.

μ = permeabilidad del material del hilo de guarda.

II.2.3.b.- Corrientes en los hilos de guarda:

Es de interés conocer la corriente que circulará por el hilo de guarda, con el fin de determinar su sección. La corriente en el tramo n -ésimo del hilo es:

$$i_n = I \frac{r_e + j\omega M}{r + r_e + j\omega L} + U_0 \frac{(e^{\alpha + j\beta} - 1)}{r + r_e + j\omega L} e^{-(\alpha + j\beta)n} \quad \text{Ec. 2.48}$$

Si se trata de un tramo suficientemente alejado del sitio de falla ($n \rightarrow \infty$, en la práctica se consigue éste efecto para $n=20$), se tendrá:

$$i_n = I \frac{r_e + j\omega M}{r + r_e + j\omega L} \quad \text{Ec. 2.49}$$

En ésta igualdad se observa que no interviene la resistencia de puesta a tierra de las torres (R), lo cual se explica puesto que a una distancia considerable del sitio de falla el potencial del hilo de guarda, es prácticamente igual al potencial del suelo, o sea que las torres no conducen corriente a tierra en tales condiciones.

CAPITULO TERCERO

ESTUDIO DE LAS CARACTERIS -
TICAS ELECTRICAS DEL SUELO

III.1.- CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL SUELO:

Se ha visto anteriormente, que la resistencia de puesta a tierra, varía - con la resistencia específica del suelo, la misma que sufre a su vez variaciones con diversos factores tales como la humedad, salinidad, temperatura y características geológicas. Naturalmente estas variaciones no solo se refieren a diferentes tipos de suelo sino también al mismo terreno sujeto a - cambios temporarios.

El suelo es un conductor de corriente eléctrica pero de muy baja conductividad comparada con los conductores metálicos. La resistencia específica del suelo se da generalmente en ohmios-metros, que es la resistencia de un cubo de tierra de 1 metro de lado, medidos entre dos electrodos metálicos - situados en dos caras opuestas.

III.2.- DETERMINACION DE LA RESISTENCIA ESPECIFICA DEL SUELO:

Para la determinación de la resistencia específica del suelo, se utiliza un "puente de medición de tierras", cuyo diagrama de funcionamientos es básicamente el indicado en la Fig. 3.1.

Por medio del generador de corriente alterna G se envía una corriente I al electrodo 1, la misma que origina potenciales en las sondas 2 y 3, el circuito se cierra a través - del contraelectrodo 4. Las 4 sondas se colocan equidistan -

tes y más o menos a una profundidad de $1/3.a$, como se muestra en la Fig. 3.2.

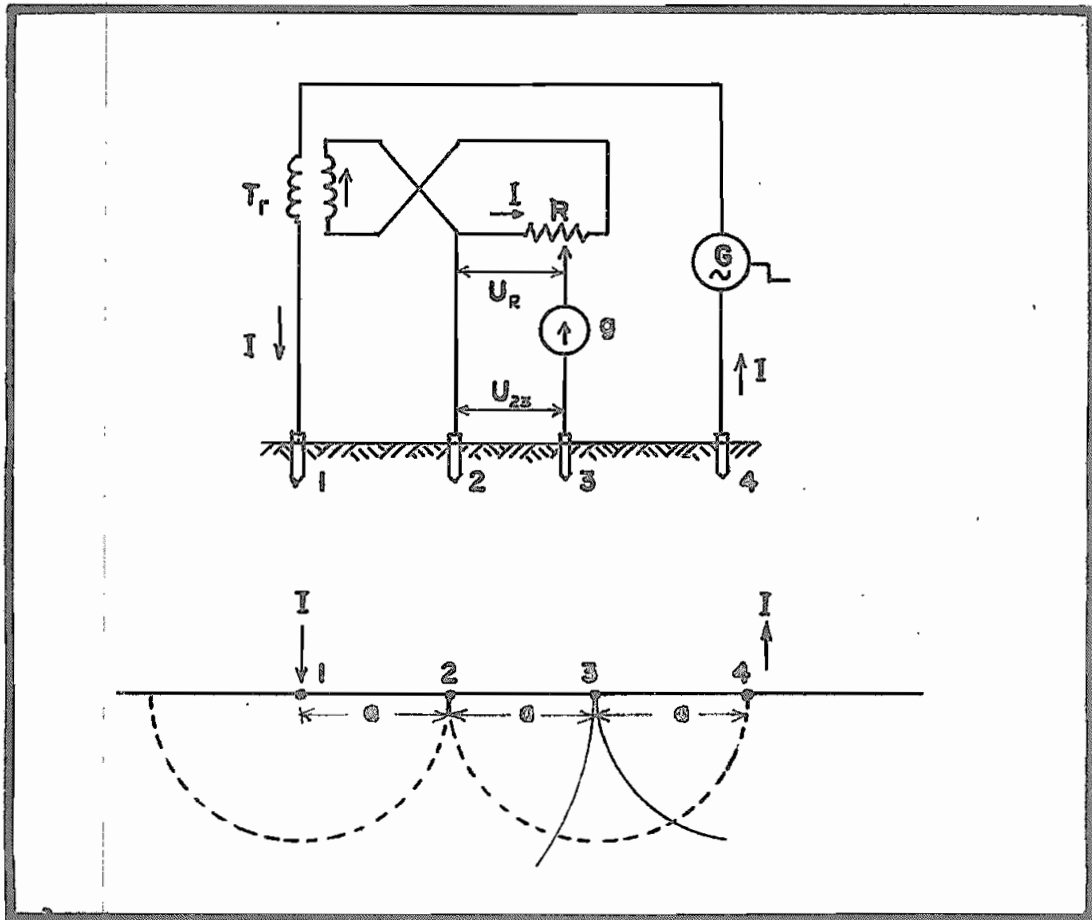


Fig. 3.1.- Puente para medición de resistencias específicas del suelo.

En virtud de la corriente I , entrante por la sonda 1, en la sonda 2 se origina el potencial:

$$U_{21} = I \cdot \rho / 2 \cdot \pi \cdot a$$

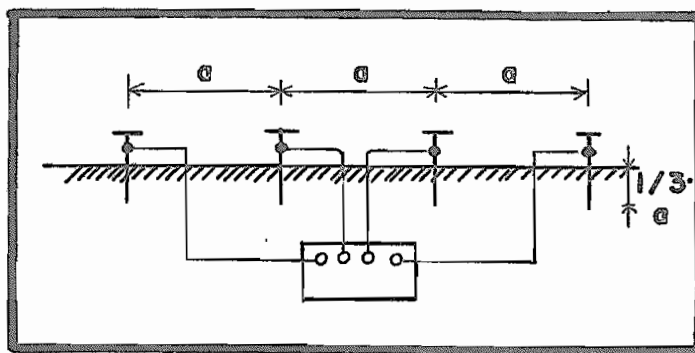


Fig. 3.2.- Distancias de las sondas para la medición.

Y en virtud de la corriente I saliente por la sonda 4 - (entrante $-I$) el potencial en el punto 2 es:

$$U_{24} = -I \cdot \rho / 4 \cdot \pi \cdot a$$

el potencial total en el punto 2 es por lo tanto:

$$U_2 = U_{21} + U_{24} = \frac{I \rho}{2 \cdot \pi \cdot a} - \frac{I \rho}{4 \cdot \pi \cdot a} = I \cdot \rho / 4 \cdot \pi \cdot a$$

similarmente en el punto 3:

debido a I :
$$U_{31} = I \cdot \rho / 4 \cdot \pi \cdot a$$

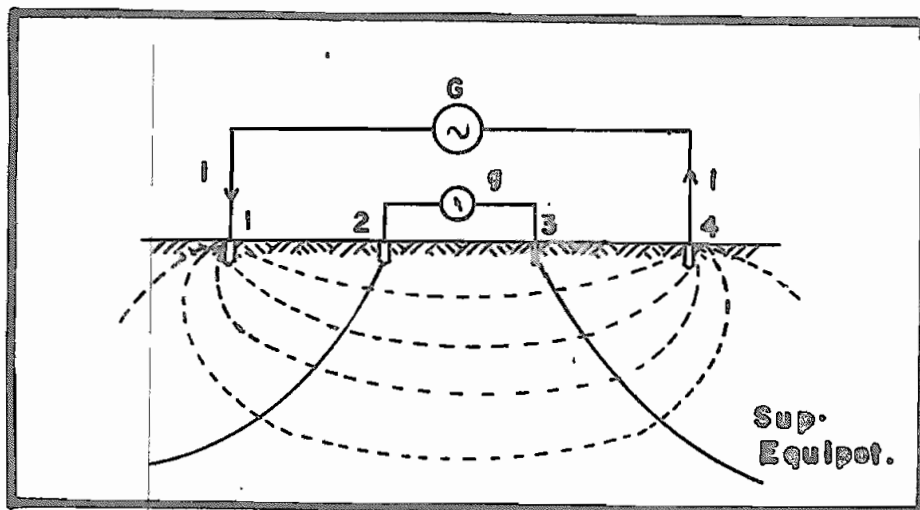
debido a $-I$:
$$U_{34} = -I \cdot \rho / 2 \cdot \pi \cdot a$$

y por lo tanto:
$$U_3 = U_{31} + U_{34} = -I \cdot \rho / 4 \cdot \pi \cdot a$$

la diferencia de potencial entre los puntos 2 y 3 es:

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot a} - \left(-\frac{I \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot a} \right) = I \cdot \rho / 2 \cdot \pi \cdot a$$

Por medio del transformador de corriente T_r (relación 1:1), se hace circular en el secundario del mismo una corriente igual a I y se provoca una caída de tensión en la resistencia variable R . Se varía R hasta que la caída de tensión U_R sea igual a la tensión U_{23} , lo que se detecta en el galvanómetro intermedio g . O sea:



)
resistencia
los poten -
metros. En
comprendido -
por la co -
y la otra -

Fig. 3.3.- Ilustración del Campo Eléctrico y las Superficies Equipotenciales.

Si la resistencia específica del suelo es constante en todas partes, al variar la distancia a , deberá variar correspondientemente el valor de R , pero deberá mantenerse la condición: $R \cdot a = \text{constante}$. Pero si varía el valor de la resistencia específica con la profundidad, esta condición -

dejará de cumplirse. Si por ejemplo el suelo en alguna región o capa se vuelve mejor conductor, entonces el producto $R \cdot a$ será menor que antes, puesto que R será también menor, si el suelo es menos conductor, ocurre el fenómeno contrario

El valor de la resistencia específica determinado de esta forma es un valor promedio, puesto que el valor de la resistencia R medido, resulta de la variación de más o menos partículas buenas conductoras del suelo hasta aproximadamente una profundidad igual a la distancia " a ". Variando " a " pueden hallarse las resistencias específicas para las diferentes capas de terreno correspondientes a la profundidad " a ". Así por ejemplo para una distancia entre las sondas $a = 10$ metros se obtiene la resistencia específica del suelo para una profundidad de 10 metros, etc.

De las mediciones llevadas a cabo de esta forma se pueden encontrar los diferentes valores de la resistencia específica del suelo para varias capas de terreno según cual sea el comportamiento del mismo. En la Fig. 3.4. pueden observarse 3 curvas que dan los comportamientos de diferentes tipos de suelo: la curva " a " muestra un suelo que tiene su capa superior con una resistencia específica muy alta (por ejemplo arena o cascajo) y que conforme aumenta la profundidad se hace notoriamente mejor conductor (por ejemplo, debido a la presencia de barro u otro material húmedo y buen conductor); la curva " b " muestra el comportamiento de un terreno cuyas capas superiores son buenas conductoras mientras que

las inferiores tienen una resistencia específica más alta; - la curva "c" es aproximadamente una combinación de las dos anteriores.

Tales ensayos permiten reconocer si en un determinado terreno son utilizables con ventaja electrodos de conexión a tierra profundos o superficiales. Por ejemplo en un suelo -

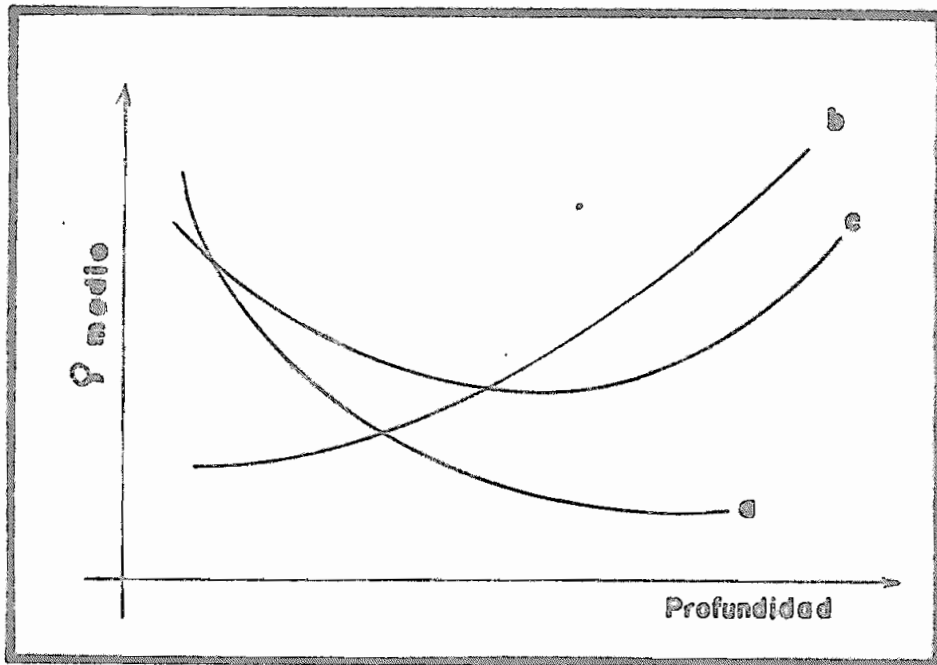


Fig. 3.4.- Valores de resistencia específica para 3 tipos de suelo, en función de la profundidad.

como el de la curva "b" a causa de la alta resistencia específica de las capas inferiores pueden y deben usarse de preferencia electrodos superficiales, tales como cuerdas, bandas, etc., en el caso de terrenos como los de la curva "a" será preferible utilizar electrodos profundos, tales como barras.

La medición de la resistencia específica para pequeños valores del espaciamiento entre las sondas (a) es en general fácil de ser llevada a cabo, cuando no existe influencia de elementos metálicos en el suelo. Cuando las distancias entre sondas son considerables, es preciso observar las siguientes recomendaciones:

1.- Las tuberías metálicas para aprovisionamiento de agua y los cables que corran paralelos a la línea imaginaria que une las sondas, influyen haciendo que el valor medido de resistencia específica sea más pequeño de lo que es en realidad. En este caso es conveniente realizar mediciones paralela y perpendicularmente a las tuberías o cables, con el fin de apreciar la influencia de los mismos en las mediciones.

2.- Es preciso utilizar un puente de medición de tierras que permita detectar valores bajos de resistencia. Para reducir al máximo los errores de medición, la resistencia de difusión de las sondas, especialmente de las externas, deberá ser baja, en lo posible no mayores de 500 ohmios. En el caso de terrenos muy conductores, esto se consigue con facilidad, sin embargo si tiene alta resistencia específica, (por ejemplo, arena seca) es necesario usar varios elementos en forma de varillas para constituir las sondas externas que se distribuyen en forma de un círculo cuyo diámetro debe ser menor o igual a $1/20.a$ y que van introducidos en el suelo e interconectados entre sí, como se observa en la Fig.3.5.

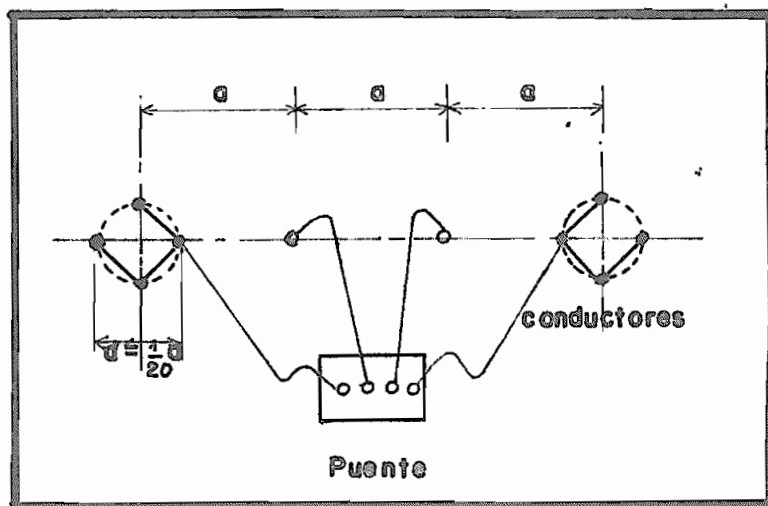


Fig. 3.5.- Disposición de las sondas en terrenos de alta resistencia específica.

En las mediciones llevadas a cabo con grandes espaciamientos entre las sondas, puede disminuirse la resistencia de puesta a tierra de las mismas, mediante el humedecimiento del terreno contiguo a ellas.

3.- Los conductores de unión del puente a las sondas, no deben tener inductividad.

4.- Las mediciones para espaciamiento entre sondas mayor a 50 metros, son inútiles de llevarse debido a la poca penetración de la corriente alterna en el suelo, por otra parte tales mediciones son poco necesarias.

La medición de la resistencia específica del suelo pue-

de ser llevada a cabo con diversas finalidades, entre ellas:

1.- Para determinar el trazado y la profundidad de instalación de electrodos superficiales. En este caso bastan las mediciones para $a=0.5$ m. y $a=1$ m. en varios sitios del terreno, debiendo instalarse los electrodos en las regiones de menor resistencia específica.

2.- Para determinar hasta que profundidad vale la pena introducir los electrodos profundos. Para este objeto deberán realizarse mediciones sucesivas para un espaciamiento de las sondas de $a = 0.5 - 1 - 3 - 5 - 10 - 20 - 30 - 50$ metros y elaborar un gráfico de la variación de la resistencia específica, en función de la profundidad. En general si la resistencia específica disminuye con el aumento de la profundidad, lo más conveniente será escoger electrodos profundos.

III.3.- INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y LA TEMPERATURA EN LA RESISTENCIA ESPECIFICA DEL SUELO:

III.3.1.- Influencia de la Humedad:

Una ligera variación porcentual de la humedad del suelo, ocasiona una gran variación de la resistencia específica del mismo. Conforme aumenta la humedad, la resistencia específica se hace menor, sin embargo si esta humedad es excesivamente alta, la resistencia específica aumenta también su valor; de aquí se deduce por qué la resistencia de difusión de una toma de tierra instalada -

en un suelo extremadamente acuoso es en general mayor que la que ofrecería la misma toma si se instalara en un terreno limitadamente húmedo.

La humedad varía de un sitio a otro, así como varía en un mismo sitio con el transcurso del tiempo, debido especialmente a las precipitaciones. En la Fig. 3.6 se puede observar la variación de la resistencia específica en función de la humedad para tres tipos diferentes de terreno.

III.3.2.- Influencia de la Temperatura:

La variación de la temperatura debe también ser tomada muy en cuenta, en cuanto ésta ejerce su influencia sobre la resistencia específica del suelo, especialmente cuando se tienen con frecuencia heladas que influyen notablemente hasta una profundidad de un metro-bajo la superficie del suelo.

La influencia de la temperatura juega un papel impor - tante sobre todo al tratarse de electrodos de conexión a tierra superficiales. En el caso de electrodos profundos una - disminución de la temperatura sólo ocasiona una disminución del rendimiento de la longitud total del electrodo.

En la Fig. 3.7 se puede ver claramente, la variación indicada, se ha tomado como valor de comparación la resistencia específica del suelo a una temperatura de 20°C que es igual - a 1 y en base a éste los valores para diferentes temperaturas.

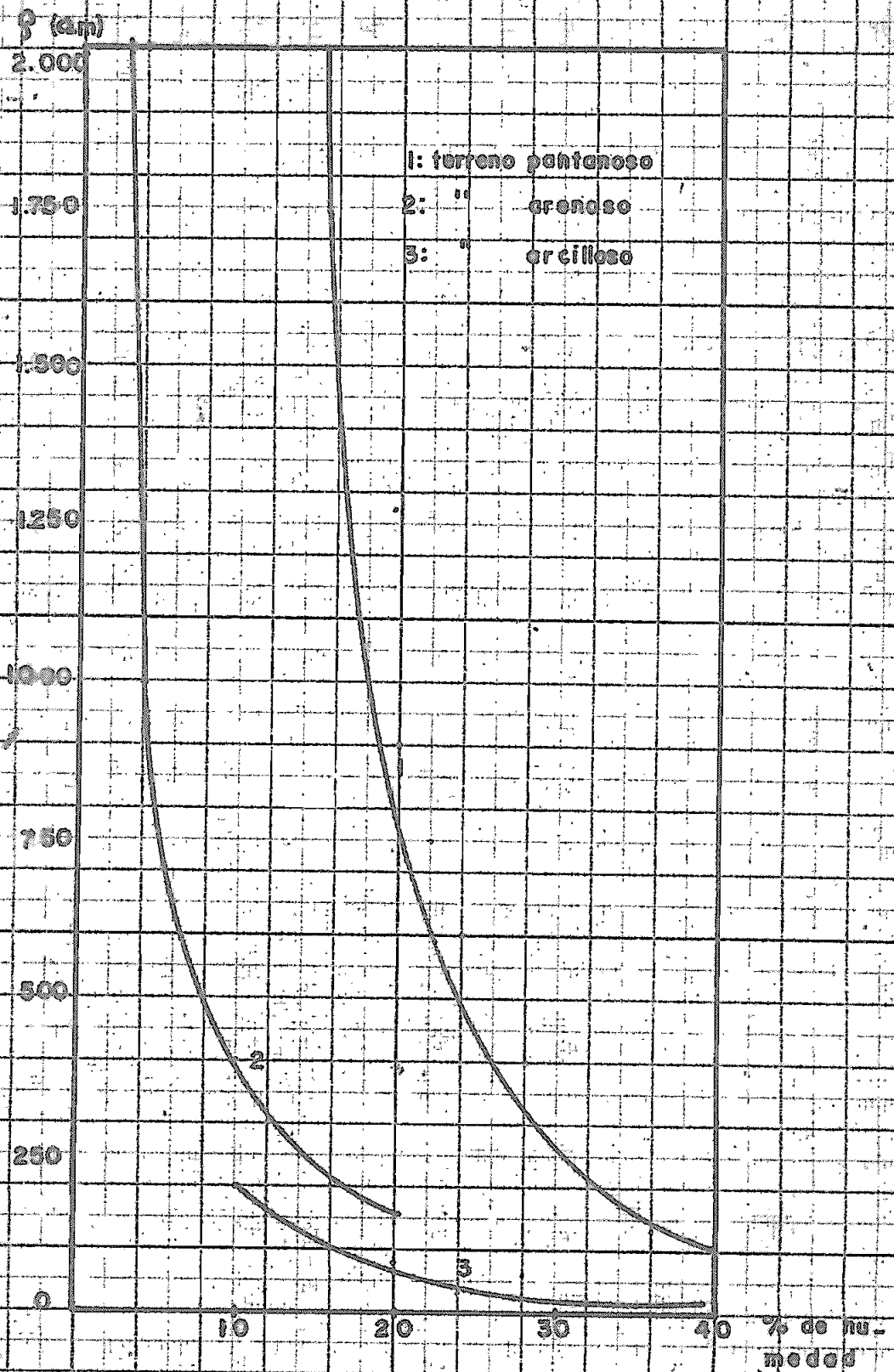


FIG. 3-6: VARIACION DE τ CON LA HUMEDAD

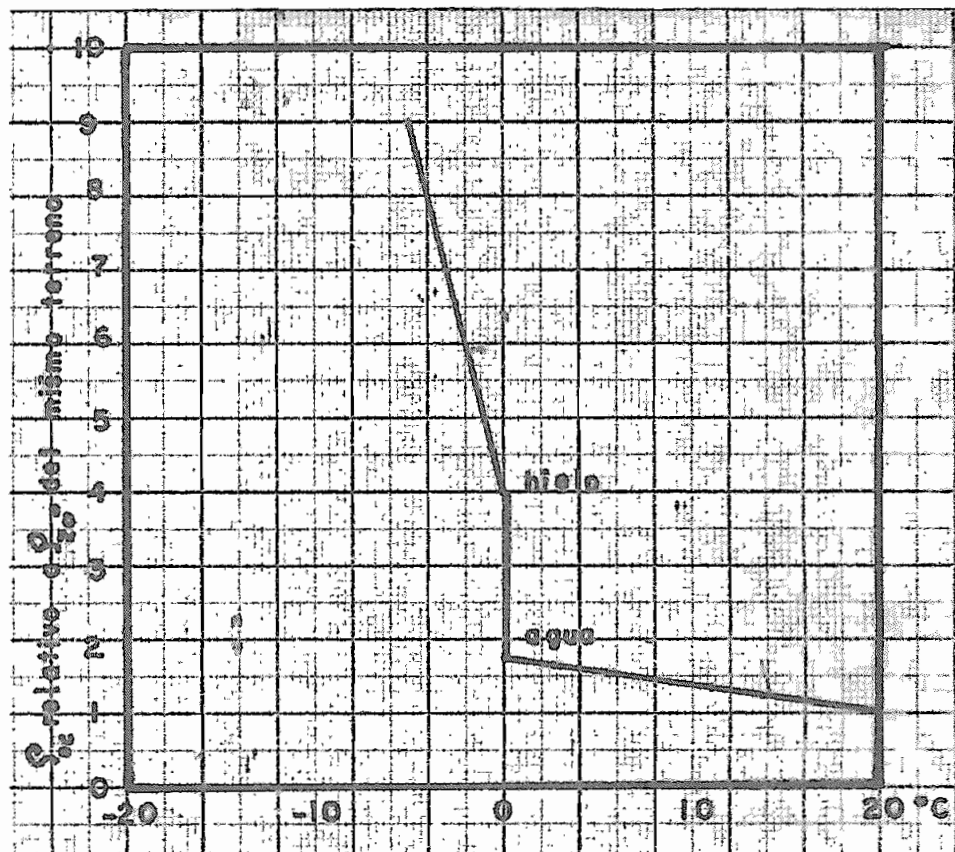


Fig. 3.7.- Variación de la Resistencia específica del suelo con la temperatura.

III.4.- VALORES TÍPICOS DE RESISTENCIAS ESPECÍFICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO:

A continuación se indican algunos valores de resistencias específicas para diferentes materiales y tipos de suelo. Estos datos indican solamente el orden de la magnitud en que se encuentran tales valores de resistencia específica y sirven por lo tanto únicamente como una guía para un cálculo estimativo, pues para tener datos precisos es siempre necesario realizar la respectiva medición.

MATERIAL O TIPO DE SUELO

 ρ (Ω -metro)

Metal buen conductor (Cu)	10^{-8}
Hierro, plomo	10^{-7}
Mineral buen conductor (cálcáreo)	10^{-5}
Grafito	10^{-4}
Soluciones salinas	10^{-2}
Agua de mar	1
Agua de río	10^2
Arena fina muy húmeda	10^2
Arena seca, cascajo seco	10^3
Yeso seco	10^3
Basalto	10^4
Rocas compactas, concreto seco	10^5
Granito, mármol	$10^6 - 10^9$

Las normas alemanas VDE dan los siguientes valores esti
mativos para diferentes tipos de suelo:

Pantanos	30	ohmios-metro
Arcilla, greda, labrantío	100	"
Arena húmeda	200	"
Grava húmeda	500	"
Arena o grava seca	1.000	"
Rocas	3.000	"

III.5.- MEDICION DE LA RESISTENCIA DE DIFUSION DE LOS ELECTRODOS DE CONEXION A TIERRA:

La medición de la resistencia de difusión de los electrodos, debe ser llevada a cabo con frecuencia, aun cuando las instalaciones están ya en funcionamiento, con el fin de determinar si éstas aun siguen conservando los valores permisibles.

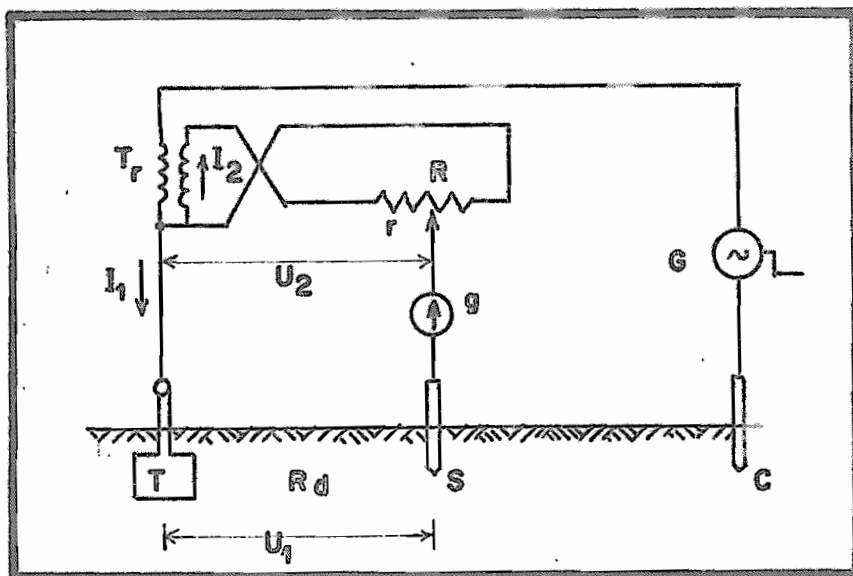


Fig. 3.8.- Puente para la medición de la Resistencia de Difusión de los Electrodos.

Los instrumentos que se usan para la medición de la resistencia de difusión de los electrodos son variados, prefiriéndose aquellos que permiten una lectura directa de los valores requeridos. Los puentes de medición utilizados para la determinación de la resistencia específica del suelo, cuyo funcionamiento se explicó en el acápite III.2, se utili-

zan también para la medición de la resistencia de difusión de los electrodos de conexión a tierra, pero para éste objeto se utilizan solamente tres terminales del puente. El principio de funcionamiento es básicamente el ya indicado; en la Fig. 5.6 se indica el diagrama de conexiones.

El generador G produce corriente alterna que circula a través del transformador Tr y de la toma de tierra T, cerrando el circuito por el contraelectrodo C. El secundario del transformador está cerrado a través de la resistencia R, y por ella la corriente que circula es la misma que por el primario de Tr ya que éste tiene relación 1:1. Un galvanómetro sensible g detecta el paso de corriente a través de la sonda S. Sobre la resistencia R existe un contacto móvil, el mismo que se desplaza hasta que el galvanómetro g indique que no hay corriente circulante por la sonda S, mientras está accionado el generador G. De esta forma la tensión U_1 entre el electrodo de conexión a tierra T y la sonda S es igual a la tensión U_2 entre T y la resistencia móvil de R. Puesto que en estas condiciones la sonda S está sin corriente, la corriente en R es igual a la corriente en T y por lo tanto la porción de la resistencia R a la cual se consiguió hacer que la corriente en S sea cero (r), será igual al valor de la resistencia de difusión del electrodo de conexión a tierra T.

En efecto, al no circular corriente por g, la corriente I_1 circula sólo a través de T y C y puesto que entre T y S, se encuentra la resistencia de difusión (R_d) que se desea me

dir, la caída de tensión U_1 es:

$$U_1 = I_1 \cdot R_d$$

La caída de tensión en la porción de resistencia r del reóstato R (U_2), es:

$$U_2 = I_2 \cdot r$$

y puesto que: $U_1 = U_2$ y a su vez $I_1 = I_2$, se tiene:

$$I_1 \cdot R_d = I_2 \cdot r$$

y por lo tanto: $R_d = r$

lo que indica que el valor de la resistencia de difusión R_d es igual al valor de la porción r de la resistencia variable R .

Es importante elegir una distancia considerable entre S y T , así como entre C y S . El electrodo T , la sonda S y el contraelectrodo C deben colocarse en línea recta y equidistantes, para obtener un resultado satisfactorio. Sin embargo para mayor precisión se hace variar la ubicación de S desde zonas cercanas a T hasta zonas próximas a C , obteniendo así valores diversos de R_d , que se llevan a una curva como la indicada en la Fig. 3.9. La parte plana de la curva, se acepta como la resistencia de difusión buscada.

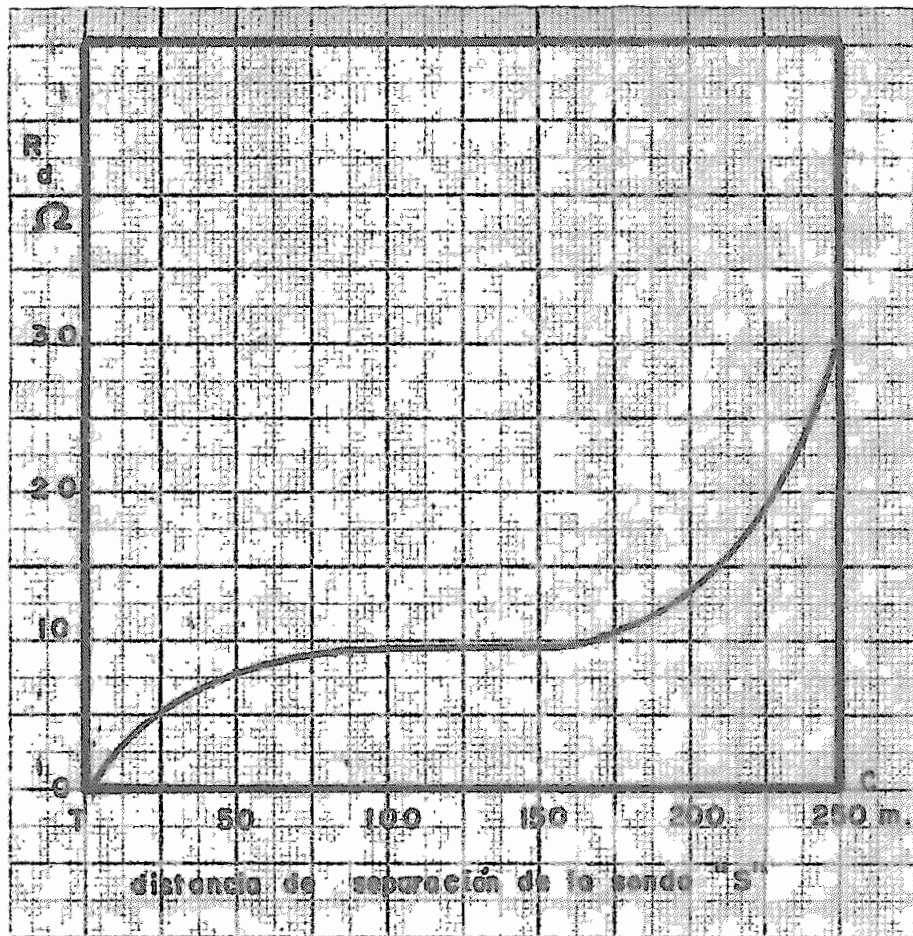


Fig. 3.9.- Variación de los valores medidos de la resistencia de difusión de un electrodo en función de la ubicación de la sonda S.

Las distancias a que se deben colocar los electrodos es un punto muy importante, variando éstas según el tipo de electrodos cuya resistencia de difusión se va a medir. Como guía se indica que para una toma de tierra T constituida por un tubo simple, el contraelectrodo de corriente C debe colocarse a una distancia de 18 a 24 m. y la sonda S en la mitad de los dos. Para una toma constituida por varios tubos o ba

rras en paralelo la distancia entre T y C debe ser de 60 a 90 metros, mientras que para tomas de gran extensión, como a aquellas constituidas por varias barras o tubos, estructuras de acero, etc. dicha distancia debe ser de 150 a 180 metros.

CAPITULO CUARTO

POSIBILIDADES DE CONE-
XION DEL PUNTO NEUTRO.

IV.1.- ESTUDIO GENERAL:

La conexión del punto neutro de las líneas de transmisión, no tiene mayor influencia en la transmisión de energía, mientras el sistema está en funcionamiento normal, toma sin embargo gran importancia al hablarse de la frecuencia de fallas a que está sujeta una red y del número de desconexiones que estas pueden ocasionar. Cabe señalar - que el método de conexión del punto neutro de los sistemas de potencia es de los de más difícil decisión, de ahí las diferencias entre las prácticas americanas y europeas; los factores que influyen en tal elección son variados y se discutirán posteriormente.

Como se señaló en el párrafo anterior, uno de los principales factores es el de las fallas ocurridas en el sistema, de estadísticas se deduce que de entre todas las fallas que pueden ocurrir, la de un contacto monofásico a tierra equivale del 70 al 90% de la totalidad. La magnitud de la corriente de cortocircuito a tierra depende principalmente de la resistencia existente entre el neutro del sistema y tierra para el caso en que ésta resistencia sea baja; en el caso de una resistencia de puesta a tierra alta, juega también un papel importante el voltaje de la red y la capacitancia a tierra de las líneas.

De acuerdo a estas consideraciones se distinguen dos tipos generales de puesta a tierra con sus subdivisiones, que son: redes con "alta" y con "baja" resistencia de puesta a tierra de su punto neutro.

IV.1.1.- Líneas con alta resistencia de puesta a tierra de su punto neutro:

IV.1.1.a.- Líneas con el punto neutro aislado:

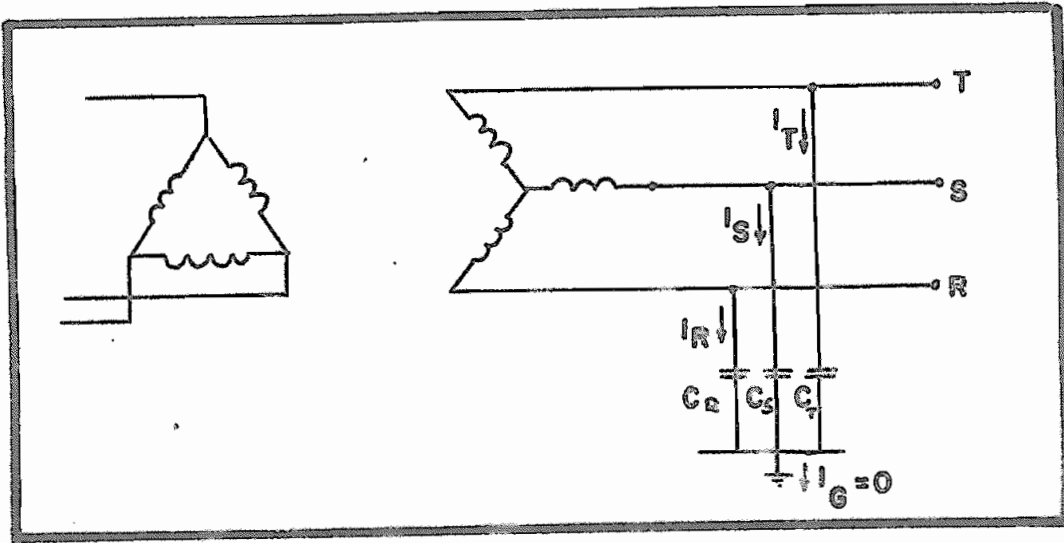


Fig. 4.1.- Esquema de corrientes para una red con neutro aislado, en funcionamiento normal.

En el caso de una línea con el neutro aislado, en servicio normal las tres fases tienen con mucha aproximación las mismas capacitancias a tierra. Al aplicarse sobre este sistema de capacitancias en estrella un sistema balanceado de voltajes, que es el de la red, las corrientes en cada una de las capacitancias serán iguales y desplazadas entre sí 120 grados. Siendo estas corrientes iguales lo serán también los voltajes en cada una de dichas capacitancias, separadas así mismo 120 grados, por lo tanto entre el punto neutro del sistema y el neutro de las capacitancias no habrá di

ferencia de potencial. De esto se puede concluir que al estar el neutro de las capacitancias al potencial de tierra, el neutro del sistema estará también a ese potencial.

Si ocurre una falla a tierra por ejemplo en la fase R, por la capacitancia C_R no habrá ninguna circulación de corriente, puesto que desaparece el voltaje impreso en la misma. Por otra parte el voltaje a través de las otras dos ca-

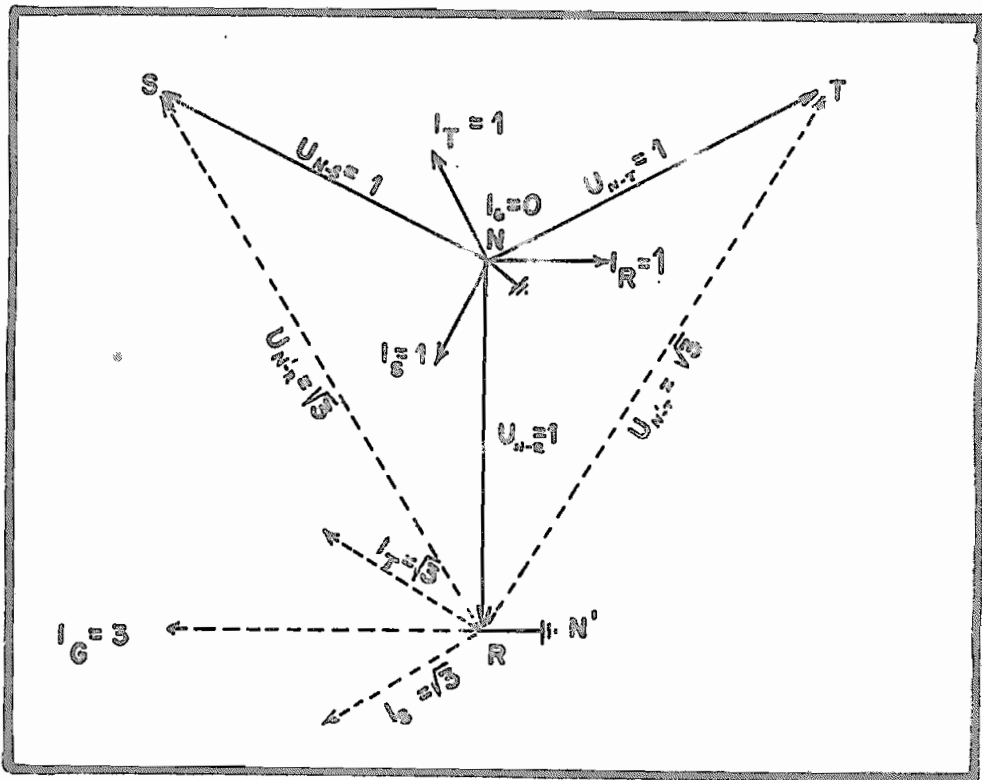


Fig. 4.2.- Diagrama de Vectores para una red con neutro aislado: En línea continua, corrientes y voltajes antes de la falla y en línea de segmentos durante una falla de la fase R a tierra,

capacitancias aumenta de valor, pues del voltaje de fase que tenían inicialmente tendrán ahora el voltaje de línea, ya que la tierra aumenta su potencial al ponerse en contacto con la fase R, en un valor igual al voltaje de fase, según se puede observar en la Fig. 4.2. Además los voltajes de fase a tierra ya no están separados 120 grados sino solamente 60° y la suma de corrientes de fase ya no es cero sino tres veces la corriente de fase en estado normal, siendo esta suma igual a la corriente de falla a tierra I_g .

Estas consideraciones se han hecho bajo el supuesto de que la capacitancia a tierra de las tres fases son iguales, lo cual es cierto en líneas transpuestas, sin embargo si la línea no es transpuesta, las capacitancias a tierra no serán exactamente iguales y habrá por lo tanto un desbalanceamiento entre el neutro del transformador y el neutro del sistema de capacitancias; tal desbalanceamiento no sobrepasa en el peor de los casos el 5% del voltaje de fase cuando la línea está en funcionamiento normal.

Al ocurrir una falla monofásica a tierra, por el sitio de falla circulará una corriente puramente capacitiva, que origina un arco de la misma característica, cuya extinción es muy dificultosa, ya que debido al desplazamiento existente entre la tensión aplicada a la capacitancia y la corriente que circula por la misma, dicho arco se origina nuevamente cada vez que tiende a extinguirse. Por esta razón una falla monofásica a tierra, con altas corrientes de falla ocasiona-

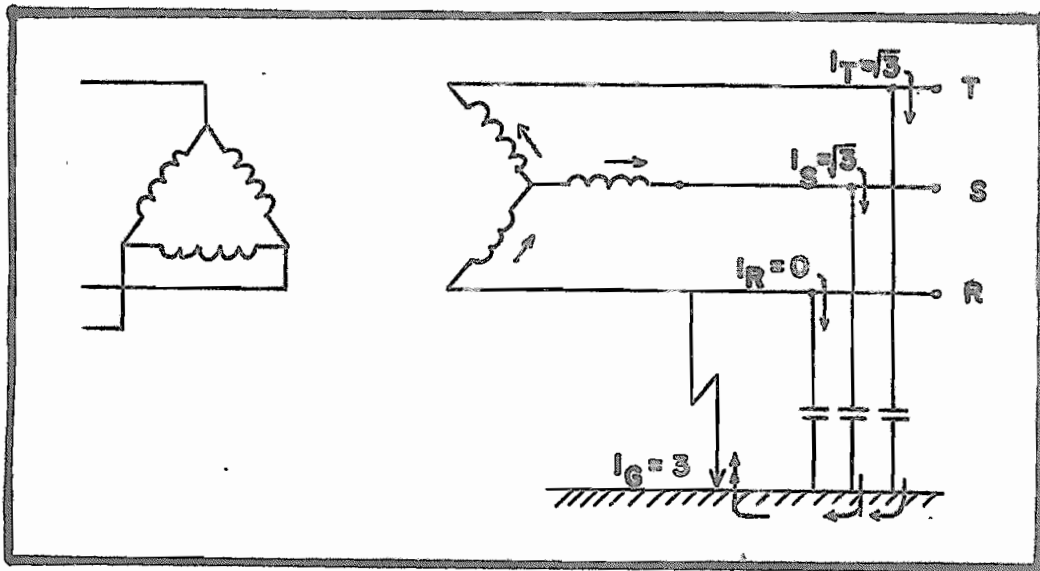


Fig. 4.3.- Esquema de corrientes durante una falla de la fase R a tierra para una red con neutro aislado.

un daño progresivo en el aislamiento, que en el caso de cables puede llegar a convertirse en un cortocircuito entre fases con contacto a tierra. Este inconveniente de la extinción del arco, cuando tal eventualidad se presenta es uno de los inconvenientes de las líneas con neutro aislado; sin embargo en una gran parte de los casos tal extinción es fácil de llevarse a cabo por sí sola cuando la corriente capacitiva de falla no es demasiado alta, lo cual permite a la línea seguir funcionando sin desconectarse y constituye por lo tanto una ventaja que abona en favor de este tipo de redes.

Las probabilidades de que la falla monofásica a tierra-

se despeje por sí sola en las redes con neutro aislado, disminuyen conforme aumenta la longitud de la línea y aumenta el voltaje de servicio; un límite aceptable para tener el mínimo de interrupciones quizá sería 160 Km. de línea a 11 KV. y 40 Km. a 69 KV., para líneas de este orden o menores, las interrupciones debidas a fallas serán menores para aquellas con neutro aislado que para las que tienen cualquier otro tipo de conexión del punto neutro, lo cual ofrece naturalmente una mejor continuidad de servicio.

Los pararrayos deben ser diseñados para el voltaje de línea ya que éste es el valor que adopta el voltaje fase-neutro, en caso de una falla monofásica a tierra; sin embargo es práctica común instalar los pararrayos para un valor del 105 por ciento del voltaje de línea con el fin de permitir un margen a la sobreelevación de tensión fase-neutro, esto naturalmente resta efectividad a los pararrayos y aumenta el costo de instalación.

La protección selectiva es también dificultosa en este tipo de redes, debido a la escasa longitud de las mismas, pero si por otra parte los circuitos son suficientemente largos tal que se produzcan corrientes de falla capaces de hacer operar los dispositivos de protección, la extinción del arco será consecuentemente más dificultosa y se habrá perdido así la principal ventaja que es la del auto-despeje de las fallas monofásicas a tierra.

Por lo general en líneas con neutro aislado, las co -

rrientes de falla a tierra no son capaces de producir interferencias en los sistemas de comunicaciones cercanos, sin embargo en líneas que no tienen buen mantenimiento o diseño, puede existir un desplazamiento del neutro que al ocasionarse una falla a tierra, produzca una falla consecutiva en otra de las fases, teniéndose así un cortocircuito doble a tierra cuya corriente es comparable a las producidas en redes con neutros directamente conectados a tierra y que puede ocasionar serios disturbios en los sistemas de comunicaciones. Además tales interferencias no son solamente función de la magnitud de la corriente, sino también de la duración y de la forma de la onda de corriente.

IV.1.1.b.- Líneas con el neutro conectado a tierra por medio de bobinas de inductancia (Petersen):

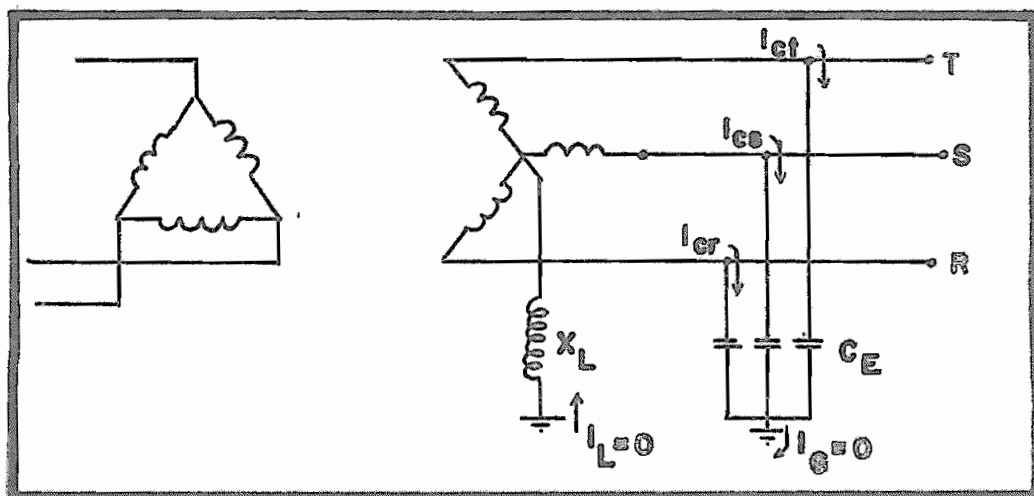


Fig. 4.4.- Esquema de corrientes para redes con bobina de inductancia, en funcionamiento normal.

Como se anotó en el caso anterior de líneas con el neutro aislado, uno de sus principales inconvenientes es la dificultad de extinción del arco cuando las corrientes son muy altas. Para obviar esta dificultad se utiliza con mucha ventaja, la conexión del neutro a tierra por medio de bobinas de inductancia, conocidas generalmente con el nombre de Bobinas Petersen.

Siguiendo igual razonamiento que en el caso anterior, se puede llegar a la conclusión de que en funcionamiento normal el neutro del sistema se encuentra al mismo potencial de tierra.

Al ocurrir una falla a tierra, sea por ejemplo de la fase R, la corriente I_{cR} deja de circular y así mismo el volta je impreso en las otras dos capacitancias aumenta al valor de la tensión de línea, ya que hay un desplazamiento del neutro de las capacitancias, que adquiere el potencial de R, o lo que equivale a decir que entre el neutro del sistema y tierra existe una diferencia de potencial U_M igual a la tensión de fase, el mismo que es aplicado a la bobina de inductancia L y que por lo tanto origina una corriente inductiva I_L que circulará por el sitio de falla, en contraposición con la corriente I_c que circula por el mismo sitio y que ya no es cero, sino tres veces la corriente de fase en estado normal, o sea la suma de $I_{cs} + I_{ct}$. Todo esto se puede observar en las Figs. 4.5 y 4.6.

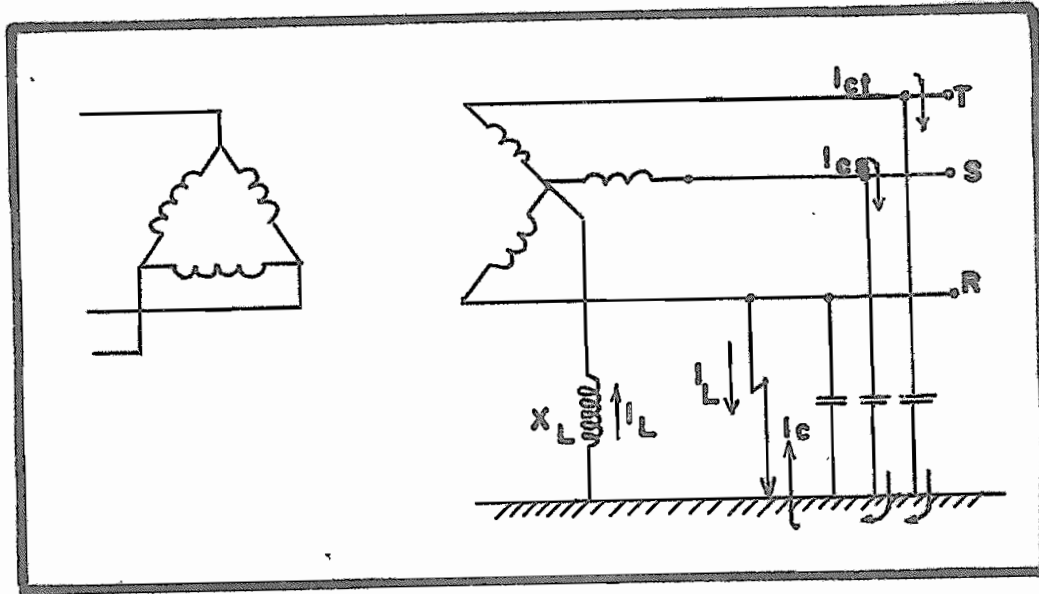


Fig. 4.5.- Esquema de corrientes para una red con bobina de inductancia, en caso de falla de la fase R.

Las corrientes I_L e I_C están opuestas entre sí prácticamente 180° y por lo tanto si I_L se hace igual a I_C la suma vectorial de las dos será cero, o sea que la corriente de falla es nula. Por lo tanto la bobina Petersen debe diseñarse de tal forma que origine una corriente I_L igual a I_C , en la práctica estas bobinas tienen varios taps de selección con el fin de escoger el que más se ajuste a un caso específico.

El arco que tiende a producirse debido a las corrientes capacitivas son anuladas casi por completo por la corriente inductiva, en realidad queda una corriente residual I_R , debido a que no se puede conseguir un desplazamiento exacto de -

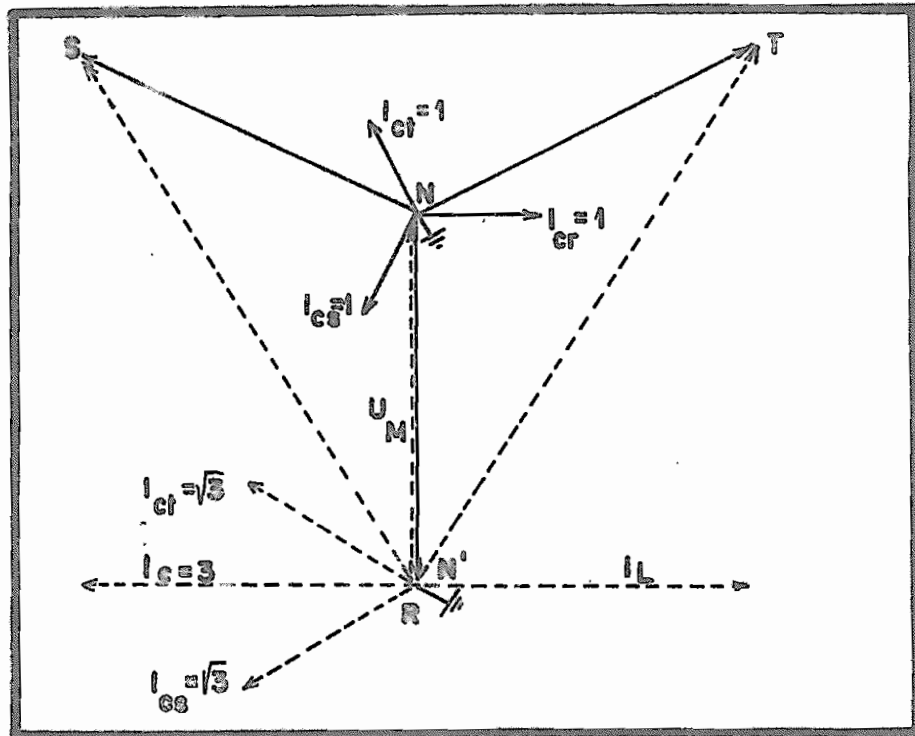
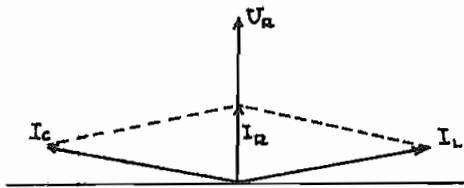


Fig. 4.6.- Diagrama de Vectores de corrientes y voltajes, para una red con bobina de inductancia: en líneas continuas, antes de la falla y en líneas de trazos durante la falla en la fase R a tierra.

180° entre I_L e I_C , debido a la resistencia del aislamiento de las líneas y dieléctricos y a la resistencia propia de la bobina. Esta corriente residual es casi puramente resistiva y su magnitud depende de las "resistencias a tierra de los conductores" y de la resistencia de la bobina de inductancia y es general mucho más pequeña que la corriente capacitiva que se origina en el caso de una red similar con el neutro -

aislado (menor que el 10% de la corriente a compensarse). - Al ser la corriente puramente resistiva, ésta y el voltaje - están en fase en el sitio de falla, haciéndose por lo tanto - fácil la extinción del arco producido, al momento en que las dos magnitudes pasen por cero.



I_C = corriente capacitiva.

I_L = corriente inductiva.

I_R = corriente resistiva residual.

Fig. 4.7.- Diagrama real de corrientes en el sitio de la falla, para una red con neutro a tierra con bobina de inductancia.

La reactancia de la bobina Petersen, para lograr una - compensación en el sitio de falla, debe ser tal que:

$$X_L = 1 / 3 \cdot \omega \cdot C_E$$

siendo: X_L = reactancia de la bobina Petersen + reactancia del transformador.

C_E = capacitancia a tierra de la línea.

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ = frecuencia angular del sistema.

El campo de aplicación de las bobinas Petersen, está limitado a redes de medio voltaje (6 a 110 KV). En redes de más alto voltaje (mayores de 220 KV.) y de grandes dimensio-

nes o en redes de alto voltaje de cables subterráneos, la corriente residual I_R puede ser todavía muy grande, que resulta difícil una autoextinción del arco. En este tipo de redes se suele unir el neutro directamente a tierra o por medio de resistencias limitadoras de corriente. Además en las redes de alto voltaje, el efecto corona, es también un factor que dificulta la autoextinción del arco.

IV.1.2.- Líneas con baja resistencia de conexión a tierra de su punto neutro:

Una red con baja resistencia de conexión a tierra, es aquella en que sus puntos neutros están conectados a tierra directamente o por medio de resistencias limitadoras de corriente y la protección de la red está diseñada de tal forma que en caso de una falla monofásica a tierra siempre se origina una desconexión de la parte fallosa.

IV.1.2.a.- Líneas con el neutro directamente conectado a tierra:

La expresión "directamente conectado a tierra" indica que el neutro del transformador se conecta a tierra, sin ninguna impedancia intermedia. Sin embargo esta unión debe ser realizada de tal forma que se cumplan algunas condiciones, para constituir lo que se denomina un sistema con el neutro "efectivamente o rígidamente conectado a tierra". Estas condiciones son las siguientes según dos diferentes normas:

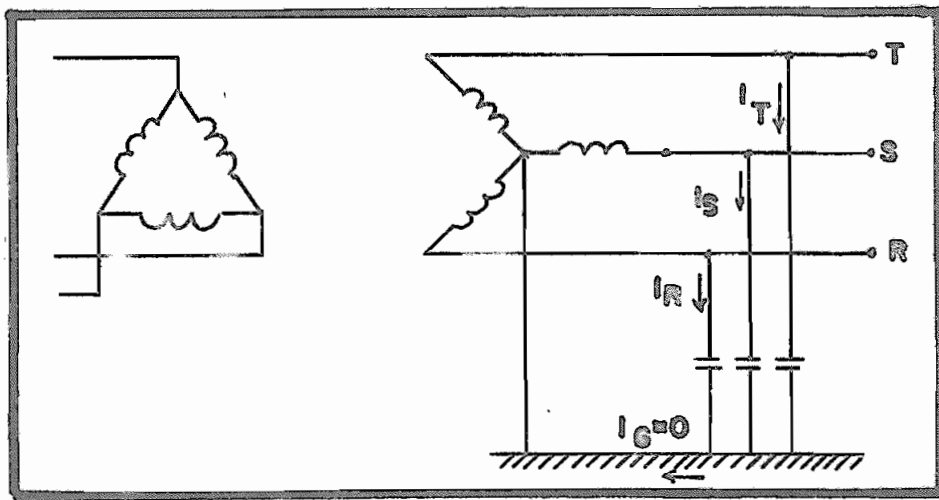


Fig. 4.8.- Esquema de un sistema con el neutro directamente conectado a tierra.

Según AIEE 32-1.05: " Un sistema o tramo de un sistema se llama efectivamente conectado a tierra, cuando para todos los puntos de los mismos la relación de la reactancia de secuencia cero a la reactancia de secuencia positiva no sea mayor que tres ($X_0/X_1 \leq 3$) y que la relación de la resistencia de secuencia cero a la resistencia de secuencia positiva no sea mayor que uno ($R_0/R_1 \leq 1$) para cualquier condición de operación y para cualquier capacidad de generación."

Según VDE 0111/2.61: " Se dice que un sistema es efectivamente conectado a tierra cuando para el caso de un cortocircuito monofásico a tierra-

los voltajes de los conductores sanos con respecto a tierra, en ningún punto de la red sobrepasan el valor de $0.8 \times \text{Volta je de línea}$ ".

En las líneas con neutro directamente conectado a tierra, todos los contactos de una fase a tierra producen corrientes de cortocircuito muy altas, que son detectadas por los dispositivos de protección y provocan siempre la desconexión del sistema falloso. En sitios cercanos a la conexión del neutro de los transformadores a tierra, la corriente monofásica de cortocircuito a tierra, puede ser incluso mayor que la corriente trifásica de cortocircuito, por lo que en ciertos casos se pueden requerir interruptores (breakers) de capacidades de interrupción mayores que los que se requerirían para una red de los tipos antes mencionados. Como se ve, uno de los principales inconvenientes de este tipo de redes, es el de no permitir la continuidad de servicio en líneas que acusen fallas monofásicas a tierra, que son las más comunes, lo que constituye una gran molestia en el suministro de energía y puede también ocasionar problemas en la estabilidad del sistema. Por otra parte las altas corrientes de cortocircuito, pueden causar en algunos casos interferencias muy serias en los sistemas de comunicaciones próximos a la línea.

La protección de fallas de cortocircuito, debe ser muy efectiva para las tres fases, lo que significa que la protección a distancia conduce a veces a una construcción de relés de diseños más caros que para redes con neutro aislado.

En cuanto a reducir al mínimo las desconexiones de servicio y evitar problemas de estabilidad en un sistema al ocurrir fallas monofásicas a tierra, en las líneas con neutro directamente conectado a tierra se puede recurrir a la "reconexión inmediata" por medio de reconectadores automáticos (reclosers). Al ocurrir una falla monofásica a tierra, el dispositivo de reconexión inmediata desconecta por un instante la fase fallosa, dejando las fases sanas en funcionamiento normal, gracias a esto no peligra la estabilidad del sistema ya que el sincronismo se mantiene a través de las 2 fases sanas y lo mismo se puede decir en cuanto a la continuidad de servicio. Naturalmente que para este tipo de servicio se requieren interruptores que tengan dispositivos de desconexión independientes para cada fase. Esta interrupción corta puede ser también trifásica, para el caso en que el interruptor posea un dispositivo de desconexión común para las tres fases. Es sabido que la desconexión y la reconexión inmediata, sea ésta trifásica o monofásica se repite un número limitado de veces según el diseño del relé de protección o hasta que la falla haya desaparecido.

IV.1.2.b.- Líneas con el neutro puesto a tierra por medio de resistencias limitadoras de corriente:

En este tipo de redes el neutro va conectado a tierra por medio de uno o más resistores. La corriente de falla de una fase a tierra viene impuesta en este caso por el valor de la resistencia de puesta a tierra, por lo cual ésta tiene una función limitadora de la corriente.

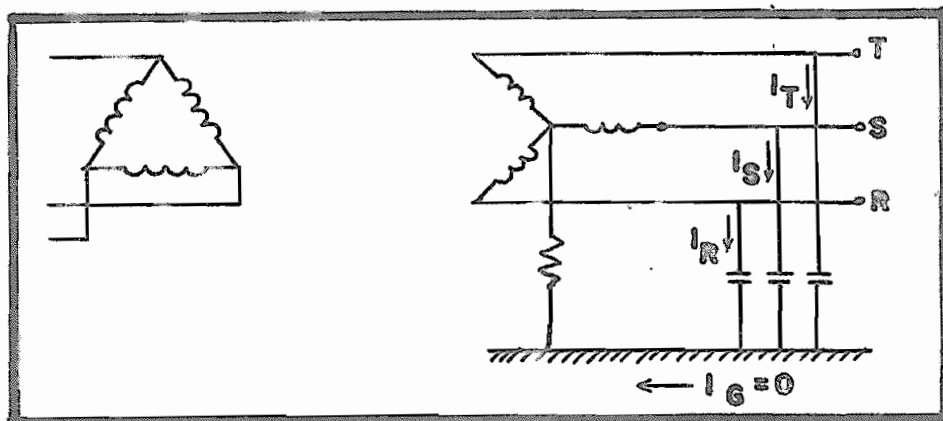


Fig. 4.9.- Esquema de una red con su punto neutro conectado a tierra por medio de resistencia limitadora.

Las razones para limitar las corrientes de cortocircuito son: reducir los efectos de fusión y sus derivados, ocasionados por las altas corrientes de falla; reducir los esfuerzos mecánicos en los circuitos portadores de corriente; disminuir los potenciales originados en los caminos de retorno de corriente a través de tierra; entre otras.

Cuando ocurre una falla monofásica a tierra, a través de la resistencia se imprime casi completamente la tensión de fase del sistema y la corriente que atraviesa la resistencia es la misma corriente de falla, o sea que dicha corriente será igual a la tensión de fase dividida para el valor de la resistencia de conexión a tierra. Las resistencias deben ser diseñadas por lo tanto para la tensión de fase y para una corriente nominal igual a la corriente que fluya en ella-

al aplicar tal tensión. La determinación del valor de la resistencia y por lo tanto de la corriente de falla se basa en dos consideraciones principales: a) disponer de la suficiente corriente para hacer funcionar los dispositivos de protección y b) limitar la corriente de tal forma de producir el mínimo daño en el sitio de falla.

En general se puede conseguir la solución más económica limitando la corriente a un rango de 10 a 25% de la corriente trifásica de cortocircuito. El límite mínimo viene dado justamente por la necesidad de una corriente mínima para la operación de los relés de protección y el límite superior de 25% viene impuesto por el costo del resistor que para altos valores de corriente ocasiona demasiadas pérdidas de energía. Para un rango superior al 25% se usan con más ventaja bobinas de inductancia.

Una de las ventajas de usar resistencias limitadoras es que las corrientes de falla originan disturbios de menor consideración en circuitos de comunicaciones próximos, que las redes con neutro directamente conectado a tierra, ya que las corrientes de falla a tierra son menores. Este tipo de redes se utilizan para tensiones que van de 3 a 15 KV.

IV.2.- ESTUDIO GENERALIZADO DE FALLAS A TIERRA PARA TODOS - LOS TIPOS DE REDES:

En una red cualquiera, es posible -
considerar varios tipos de falla, siendo los más importantes
los indicados en la Fig. 4.10.

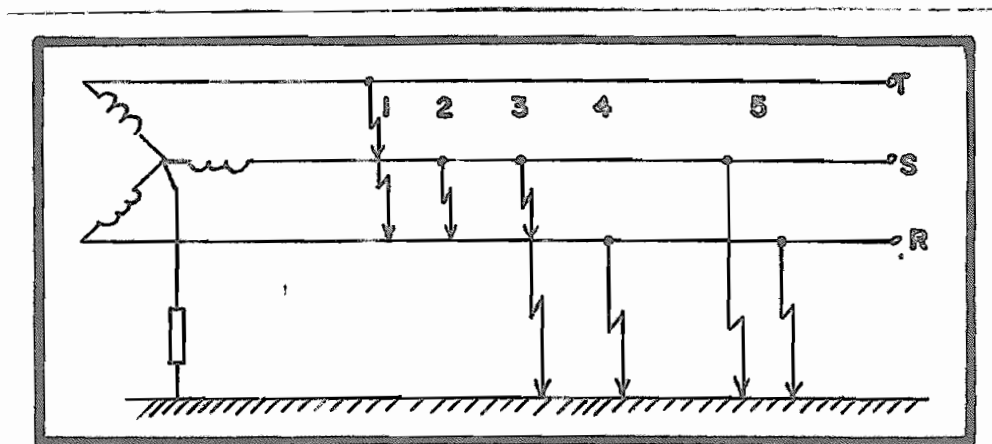


Fig. 4.10.- Esquema explicativo de los tipos de falla más im
portantes.

En esta figura los tipos de falla considerados son:

1. Cortocircuito trifásico.
2. Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra.
3. Cortocircuito bifásico con contacto a tierra.
4. Cortocircuito monofásico a tierra (el más común).
5. Cortocircuito doble a tierra.

Para el estudio independiente de cada uno de los tipos-
de falla se considerará el esquema simplificado de una red ,

según se puede apreciar en la Fig. 4.11.

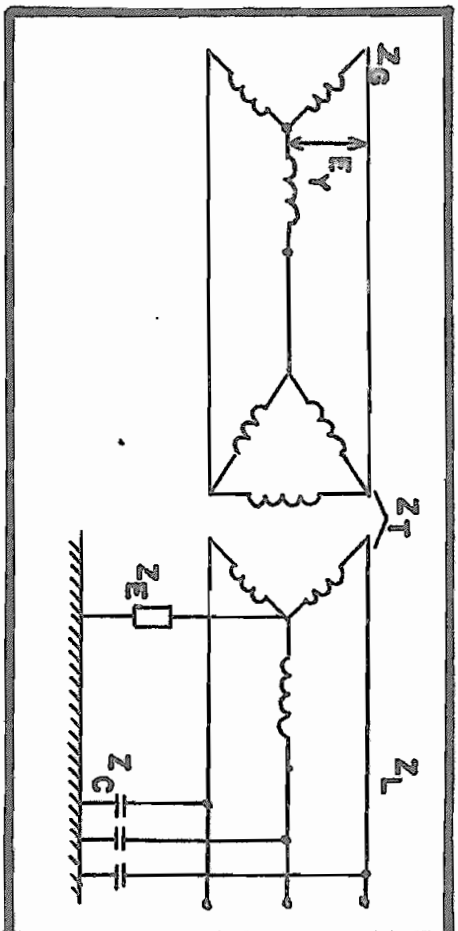


Fig. 4.11.— Esquema simplificado de una red, para efectos de estudio de los diversos tipos de falla.

En este gráfico, representan:

Z_G = Impedancia de cortocircuito del generador.

Z_T = Impedancia de cortocircuito del transformador.

Z_L = Impedancia de la línea, por fase.

Z_C = Impedancia capacitiva de la línea a tierra, por fa
se.

Z_B = Impedancia de conexión a tierra del sistema. Para
considerar el valor equivalente por fase, deberá —
tomarse $3Z_B$ /fase.

E_Y = Tensión de fase del generador.

La magnitud de la impedancia de conexión del punto neutro a tierra (Z_B), varía según los diferentes sistemas de conexión, siendo igual a infinito para el caso de una red con neutro aislado e igual a cero para redes con el neutro efectivamente conectado a tierra y adoptando valores intermedios, para redes con bobina de inductancia o resistencias limitadoras. En general las impedancias de carga se despreciarán para el cálculo de las magnitudes de cortocircuito.

IV.2.1.- Cortocircuito Trifásico:

El cortocircuito trifásico es un caso de falla simétrica. Los voltajes de las 3 fases en el sitio de falla son iguales a cero, o sea:

$$U_R = U_S = U_T = 0$$

de acuerdo a la teoría de componentes simétricas se sabe que:

$$3U_{1R} = U_R + a \cdot U_S + a^2 \cdot U_T = 0$$

$$3U_{2R} = U_R + a^2 \cdot U_S + a \cdot U_T = 0$$

$$3U_{0R} = U_R + U_S + U_T = 0$$

siedo: $a = -0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}$

$$a^2 = -0.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

de donde se obtiene que:

$$U_{1R} = U_{2R} = U_0$$

y por otra parte se tiene:

$$U_{1R} = E_Y - I_{1R} \cdot Z_1 = 0$$

$$U_{2R} = - I_{2R} \cdot Z_2 = 0$$

$$U_0 = - I_0 \cdot Z_0 = 0$$

de donde:

$$I_{1R} = E_Y / Z_1 \quad ; \quad I_{2R} = 0 \quad ; \quad I_0 = 0$$

la corriente en la fase R es:

$$I_R = I_{1R} + I_{2R} + I_0 = E_Y / Z_1$$

y en las otras dos fases:

$$I_S = a^2 \cdot I_{1R} + a \cdot I_{2R} + I_0 = a^2 \cdot E_Y / Z_1$$

$$I_T = a \cdot I_{1R} + a^2 \cdot I_{2R} + I_0 = a \cdot E_Y / Z_1$$

Como se ve las corrientes de las tres fases son iguales en magnitud, diferenciándose solamente por su posición, de tal forma que la magnitud de la corriente trifásica de cortocircuito, se puede escribir en general:

$$I_{cc(3)} = E_Y / Z_1 \quad \text{Ec. 4.1}$$

En el caso de que conjuntamente con el cortocircuito -

trifásico ocurra un contacto a tierra en el sitio de falla ;
 las condiciones permanecen inalteradas.

IV,2,2,- Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra:

Si las

fases cortocircuitadas entre sí son por ejemplo, las fases -
 S y T, las condiciones que se cumple son las siguientes:

$$U_S = U_T \quad ; \quad I_R = 0 \quad ; \quad I_S = -I_T$$

y sabiendo que:

$$U_S = a^2 \cdot U_{1R} + a \cdot U_{2R} + U_O$$

$$U_T = a \cdot U_{1R} + a^2 \cdot U_{2R} + U_O$$

y puesto que: $U_S = U_T$, se obtiene que:

$$U_{1R} = U_{2R}$$

A partir de las condiciones segunda y tercera se llega-
 a lo siguiente:

$$I_O = 1/3 \cdot (I_R + I_S + I_T) = 1/3 \cdot I_R = 0$$

$$I_R = I_{1R} + I_{2R} + I_O \quad , \quad \text{de donde:} \quad I_{1R} = -I_{2R}$$

Por otra parte:

$$U_{1R} = E_Y - I_{1R} \cdot Z_1$$

$$U_{2R} = - I_{2R} \cdot Z_2 = I_{1R} \cdot Z_2$$

$$U_0 = - I_0 \cdot Z_0 = 0$$

y puesto que: $U_{1R} = U_{2R}$:

$$E_Y - I_{1R} \cdot Z_1 = I_{1R} \cdot Z_2$$

o sea:

$$I_{1R} = -I_{2R} = E_Y / (Z_1 + Z_2)$$

Las corrientes en las fases fallosas son:

$$I_S = a^2 \cdot I_{1R} + a \cdot I_{2R} + I_0 = (a^2 - a) \cdot I_{1R} = -j\sqrt{3} \cdot E_Y / (Z_1 + Z_2)$$

$$I_T = a \cdot I_{1R} + a^2 \cdot I_{2R} + I_0 = (a - a^2) \cdot I_{1R} = j\sqrt{3} \cdot E_Y / (Z_1 + Z_2)$$

Como se observa las magnitudes de las corrientes en las fases fallosas son iguales, diferenciándose únicamente en su posición, por lo tanto en forma general la magnitud de la corriente de cortocircuito difásico sin contacto a tierra es:

$$I_{cc(2)} = \sqrt{3} \cdot E_Y / (Z_1 + Z_2) \quad \text{Bc. 4.2}$$

Para la mayoría de los casos se consigue $Z_1 = Z_2$, con lo que la expresión anterior se simplifica a:

$$I_{cc}(2) = (\sqrt{3}/2) \cdot E_Y / Z_1 = (\sqrt{3}/2) \cdot I_{cc}(3)$$

Ec. 4.2.a

El voltaje de la fase sana (R), es:

$$U_R = U_{1R} + U_{2R} + U_0 = 2U_{1R}$$

$$U_R = 2(E_Y - I_{1R} \cdot Z_1) = 2(E_Y - \frac{E_Y}{Z_1 + Z_2} \cdot Z_1)$$

$$U_R = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot E_Y$$

Ec. 4.3

Para el caso de que $Z_1 = Z_2$:

$$U_R = \frac{2}{3} E_Y$$

Ec. 4.3.a

o sea que el voltaje de la fase sana se mantiene inalterado.

IV.2.3.- Cortocircuito bifásico con contacto a tierra:

Si se-

supone que las fases fallosas son S y T, se tienen las siguientes condiciones:

$$U_S = 0 \quad ; \quad U_T = 0 \quad ; \quad I_R = 0$$

De la tercera condición:

$$I_R = I_{1R} + I_{2R} + I_O = 0$$

$$I_{1R} = -I_{2R} - I_O$$

De la teoría de componentes simétricas:

$$U_{1R} = U_R + a \cdot U_S + a^2 \cdot U_T = U_R$$

$$U_{2R} = U_R + a^2 \cdot U_S + a \cdot U_T = U_R$$

$$U_O = U_R + U_S + U_T = U_R$$

de donde:

$$U_{1R} = U_{2R} = U_O = U_R$$

a su vez:

$$U_{1R} = E_Y - I_{1R} \cdot Z_1 \implies I_{1R} = (E_Y - U_{1R}) / Z_1$$

$$U_{2R} = -I_{2R} \cdot Z_2 \implies I_{2R} = -U_{2R} / Z_2 = -U_{1R} / Z_2$$

$$U_O = -I_O \cdot Z_O \implies I_O = -U_O / Z_O = -U_{1R} / Z_O$$

y por lo tanto:

$$I_R = (E_Y - U_{1R}) / Z_1 - U_{1R} / Z_2 - U_{1R} / Z_O = 0$$

de donde:

$$U_{1R} = U_{2R} = U_0 = \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_0 \cdot Z_2 + Z_0 \cdot Z_1 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot E_Y$$

$$U_R = U_{1R} + U_{2R} + U_0$$

$$U_R = 3 \cdot \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot E_Y \quad \text{Ec. 4.4}$$

Las componentes simétricas de corriente son:

$$I_{1R} = (3Y \cdot U_{1R}) / Z_1 = \frac{Z_0 + Z_2}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot E_Y$$

$$I_{2R} = -U_{1R} / Z_2 = -\frac{Z_0}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot E_Y$$

$$I_0 = -U_{1R} / Z_0 = -\frac{Z_2}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot E_Y$$

y de aquí se obtienen los valores de corriente en las fases fallosas (S y T):

$$I_S = a^2 \cdot I_{1R} + a \cdot I_{2R} + I_0$$

$$I_S = -j_0 \sqrt{3} \cdot \frac{(1 + a^2)Z_2 + Z_0}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot B_Y \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$I_T = j_0 \sqrt{3} \cdot \frac{(1 + a)Z_2 + Z_0}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot B_Y \quad \text{Ec. 4.6}$$

La corriente de cortocircuito a tierra será la suma de las corrientes de falla I_S e I_T :

$$I_{cc(2\phi)} = I_S + I_T = -3 \cdot \frac{Z_2}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot B_Y$$

Ec. 4.7

que es la corriente bifásica de cortocircuito con contacto a tierra.

IV.2.4.- Cortocircuito monofásico a tierra:

Si la fase que está en contacto con tierra es R, las condiciones impuestas en este caso son:

$$U_R = 0 \quad ; \quad I_S = 0 \quad ; \quad I_T = 0$$

Aplicando las igualdades de las componentes simétricas:

$$3 \cdot I_{1R} = I_R + a \cdot I_S + a^2 \cdot I_T = I_R$$

$$3 \cdot I_{2R} = I_R + a^2 \cdot I_S + a \cdot I_T = I_R$$

$$3 \cdot I_O = I_R + I_S + I_T = I_R$$

de donde:

$$I_{1R} = I_{2R} = I_O = 1/3 \cdot I_R$$

por otra parte:

$$U_{1R} = E_Y - I_{1R} \cdot Z_1$$

$$U_{2R} = - I_{2R} \cdot Z_2$$

$$U_O = - I_O \cdot Z_O$$

$$y: U_R = U_{1R} + U_{2R} + U_O = E_Y - I_{1R} \cdot Z_1 - I_{2R} \cdot Z_2 - I_O \cdot Z_O = 0$$

$$U_R = E_Y - (I_R/3)(Z_1 + Z_2 + Z_O)$$

y de aquí se obtiene que la corriente en la fase R, que es la corriente de cortocircuito monofásico a tierra (I_{cc}).

$$I_{cc(1\phi)} = I_R = \frac{3E_Y}{Z_1 + Z_2 + Z_O} = 3I_O$$

Ec. 4.8

Los voltajes de las fases sanas, se pueden calcular de la siguiente forma:

$$U_S = a^2 \cdot U_{1R} + a \cdot U_{2R} + U_0$$

$$U_S = a^2 \cdot (E_Y - I_{1R} \cdot Z_1) + a \cdot (-I_{2R} \cdot Z_2) + (-I_0 \cdot Z_0)$$

y puesto que: $I_{1R} = I_{2R} = I_0 = I_{cc} (1B\psi)^{1/3}$

se obtiene finalmente:

$$U_S = \left(a^2 - \frac{Z_0 + a^2 \cdot Z_1 + a \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right) \cdot E_Y \quad \text{Ec. 4.9}$$

y de manera similar, sabiendo que:

$$U_T = a \cdot U_{1R} + a^2 \cdot U_{2R} + U_0$$

se llega a:

$$U_T = \left(a - \frac{Z_0 + a \cdot Z_1 + a^2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right) \cdot E_Y \quad \text{Ec. 4.10}$$

IV.2.5.- Cortocircuito Doble a Tierra:

Este tipo de falla ocurre, cuando simultáneamente en dos puntos diferentes o en el mismo punto de una red, dos fases se ponen en contacto con tierra; esta eventualidad es muy poco probable de que ocurra sin embargo puede suceder y para ello todos los tipos de re-

des deben tener dispositivos para despejar inmediatamente este tipo de fallas, que ocasionan corrientes de cortocircuito bastante elevadas. El estudio de las magnitudes de las corrientes y voltajes para esta falla, puede ser llevado a cabo de forma análoga a los casos anteriores.

IV.2.6.- Estudio comparativo de los diferentes tipos de falla:

Para efectos del diseño de los sistemas de conexión a tierra, son de especial interés las fallas a tierra y es por esto muy útil hacer una comparación de las corrientes ocasionadas por ellas (falla monofásica y falla bifásica a tierra), con relación a la corriente de cortocircuito trifásico a tierra, así como de los voltajes de las fases sanas en los dos casos de falla, con relación a la tensión nominal de línea del sistema, con el objeto de observar los límites de variación de tales magnitudes.

IV.2.6.a.- Falla bifásica con contacto a tierra:

IV.2.6.a.1.- Comparación de la corriente de cortocircuito bifásico con contacto a tierra, con relación a la corriente de cortocircuito trifásico:

Conoci-
das las magnitudes de las dos corrientes de cortocircuito, se pueden establecer sus relaciones, así:

$$\frac{\bar{I}_{cc(2B)}}{\bar{I}_{cc(3)}} = \frac{-3\bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2} \cdot \bar{E}_Y$$

$$\bar{I}_{cc(3)} = \frac{\bar{E}_Y}{\bar{Z}_1}$$

y puesto que para la mayoría de los casos, se cumple la relación $\bar{Z}_1/\bar{Z}_2 = 1$, o sea $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$, el cupcinete anterior se puede simplificar a:

$$\frac{\bar{I}_{cc(2B)}}{\bar{I}_{cc(3)}} = - \frac{3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + 2\bar{Z}_0} = - \frac{3}{1 + 2\bar{Z}_0/\bar{Z}_1}$$

Se tomará como variable la relación: \bar{Z}_0/\bar{Z}_1 y recordando que estos son fasores, se tendrá:

$$\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 = \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{- \Theta}$$

o sea: $\Theta = \varphi_1 - \varphi_0 = \text{ángulo de desplazamiento entre } \bar{Z}_1 \text{ y } \bar{Z}_0$

$$\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 = \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| (\cos \Theta - j \cdot \text{sen } \Theta)$$

con lo que la relación que interesa queda finalmente:

$$\frac{\bar{I}_{cc(2B)}}{\bar{I}_{cc(3)}} = - \frac{3}{1 + 2 \cdot \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cdot \cos \Theta - j \cdot \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cdot 2 \text{ sen } \Theta}$$

El denominador en forma compleja es poco útil, lo que en realidad interesa es la magnitud de la relación, que viene dada por:

$$\left| \frac{I_{cc}(2\theta)}{I_{cc}(\theta)} \right| = \frac{3}{\sqrt{(1 + 2 \cdot \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cdot \cos \theta)^2 + (2 \cdot \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cdot \sin \theta)^2}}$$

Como se puede observar el valor de la relación de las corrientes: $|I_{cc}(2\theta)/I_{cc}(\theta)|$, depende de los valores de θ y de $|Z_0/Z_1|$, dando valores sucesivos a estas variables, se obtienen las curvas de la relación buscada; las mismas que están dibujadas en la Fig. 4.12, con los valores dados a continuación:

θ \ $ Z_0/Z_1 $	0	1	2	3	6	8
0°	3.00	1.00	0.60	0.33	0.23	0.18
60°	3.00	1.14	0.65	0.35	0.245	0.18
90°	3.00	1.35	0.73	0.37	0.25	0.19
120°	3.00	1.73	0.83	0.40	0.26	0.19
180°	3.00	3.00	1.00	0.43	0.27	0.20

Valores de $|I_{cc}(2\theta)/I_{cc}(\theta)|$, para diferentes valores de θ y $|Z_0/Z_1|$.

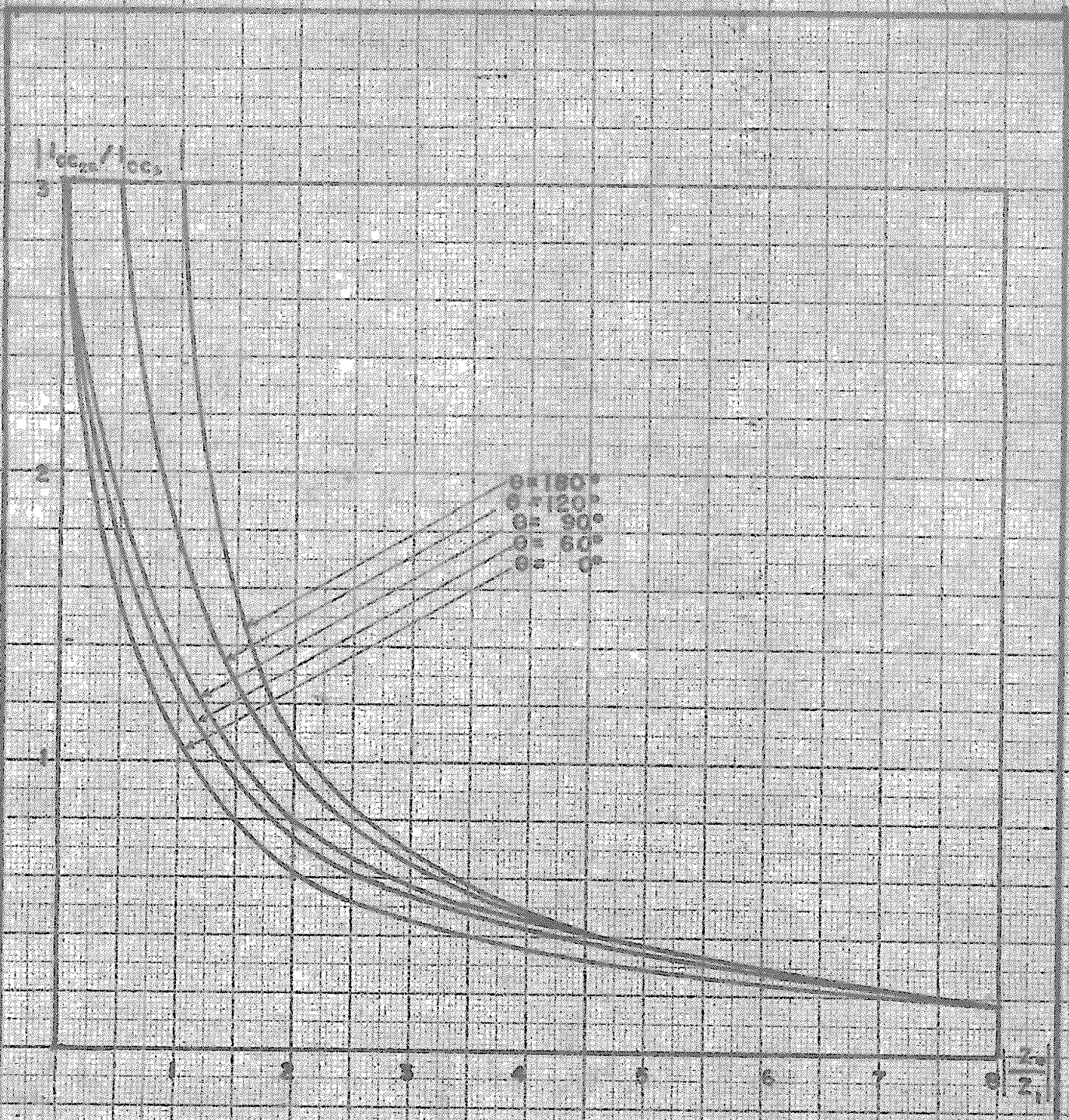


FIG. 4-12: COMPARACION DE $I_{cc_{2\theta}}$ CON RESPECTO A I_{cc_0}

IV.2.6.a.2.- Comparación de la tensión de la fase sana con respecto a la tensión de línea, para una falla bifásica con contacto a tierra:

En el acópite -

pertinente (IV.2.3) se supuso que la fase sana es \bar{R} , con la misma consideración y conociendo su valor al ocurrir la falla, se puede comparar éste con la tensión nominal de línea que es $\sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y$, así:

$$\bar{U}_R / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = \frac{3 \cdot \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2} \cdot \bar{E}_Y$$

$$\sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y$$

y así mismo para el caso más común en que: $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$, se tiene;

$$\bar{U}_R / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = \frac{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + 2 \cdot \bar{Z}_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_0 / \bar{Z}_1}{1 + 2 \cdot \bar{Z}_0 / \bar{Z}_1}$$

y recordando que \bar{Z}_0 y \bar{Z}_1 , son fasores:

$$\frac{\bar{U}_R / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y}{\sqrt{3} |Z_0/Z_1| \cdot (\cos \Theta - j \cdot \text{sen } \Theta)} = \frac{\sqrt{3} |Z_0/Z_1| \cdot (\cos \Theta - j \cdot \text{sen } \Theta)}{1 + 2 \cdot (|Z_0/Z_1| \cdot (\cos \Theta - j \cdot \text{sen } \Theta))}$$

y el módulo de esta relación, que es lo que interesa, es:

$$\left| \frac{\bar{U}_R / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y}{\sqrt{3} \cdot |Z_0/Z_1|} \right| = \frac{\sqrt{(1 + 2 \cdot |Z_0/Z_1| \cdot \cos \Theta)^2 + (2 \cdot |Z_0/Z_1| \cdot \text{sen } \Theta)^2}}{\sqrt{3} \cdot |Z_0/Z_1|}$$

Dando valores sucesivos a Θ y a $|Z_0/Z_1|$, se pueden hacer los correspondientes a $|\bar{U}_R / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y|$, los cuales están resumidos en la siguiente tabla. El gráfico correspondiente es el de la Fig. 4.13.

Θ	$ Z_0/Z_1 $	0	1	2	4	6	8
0°	0.00	0.58	0.69	0.77	0.80	0.83	
	0.25	0.65	0.75	0.82	0.85	0.87	0.89

Dando valores sucesivos a θ y a $|Z_0/Z_1|$, se pueden hallar los correspondientes a $|U_R/\sqrt{3}E_Y|$, los cuales están resumidos en la siguiente tabla. El gráfico correspondiente es el de la Fig. 4.13.

$\theta \backslash Z_0/Z_1 $	0	1	2	4	6	8
0°	0.00	0.58	0.69	0.77	0.80	0.83
60°	0.00	0.65	0.75	0.82	0.83	0.84
90°	0.00	0.78	0.83	0.86	0.87	0.87
120°	0.00	1.00	0.96	0.94	0.90	0.89
180°	0.00	1.73	1.16	0.98	0.94	0.92

Valores de $|U_R/\sqrt{3}E_Y|$, para valores diferentes de θ y $|Z_0/Z_1|$.

IV.2.6.b.- Falla monofásica con contacto a tierra:

IV.2.6.b.1.- Comparación de la corriente de falla a tierra, con respecto a la corriente de cortocircuito trifásico:

De las Ecs. 4.1 y 4.8, se llega a la relación:

$$\frac{\bar{I}_{cc(1\phi)}}{\bar{I}_{cc(3)}} = \frac{\frac{3\bar{E}_Y}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}}{\frac{\bar{E}_Y}{\bar{Z}_1}}$$

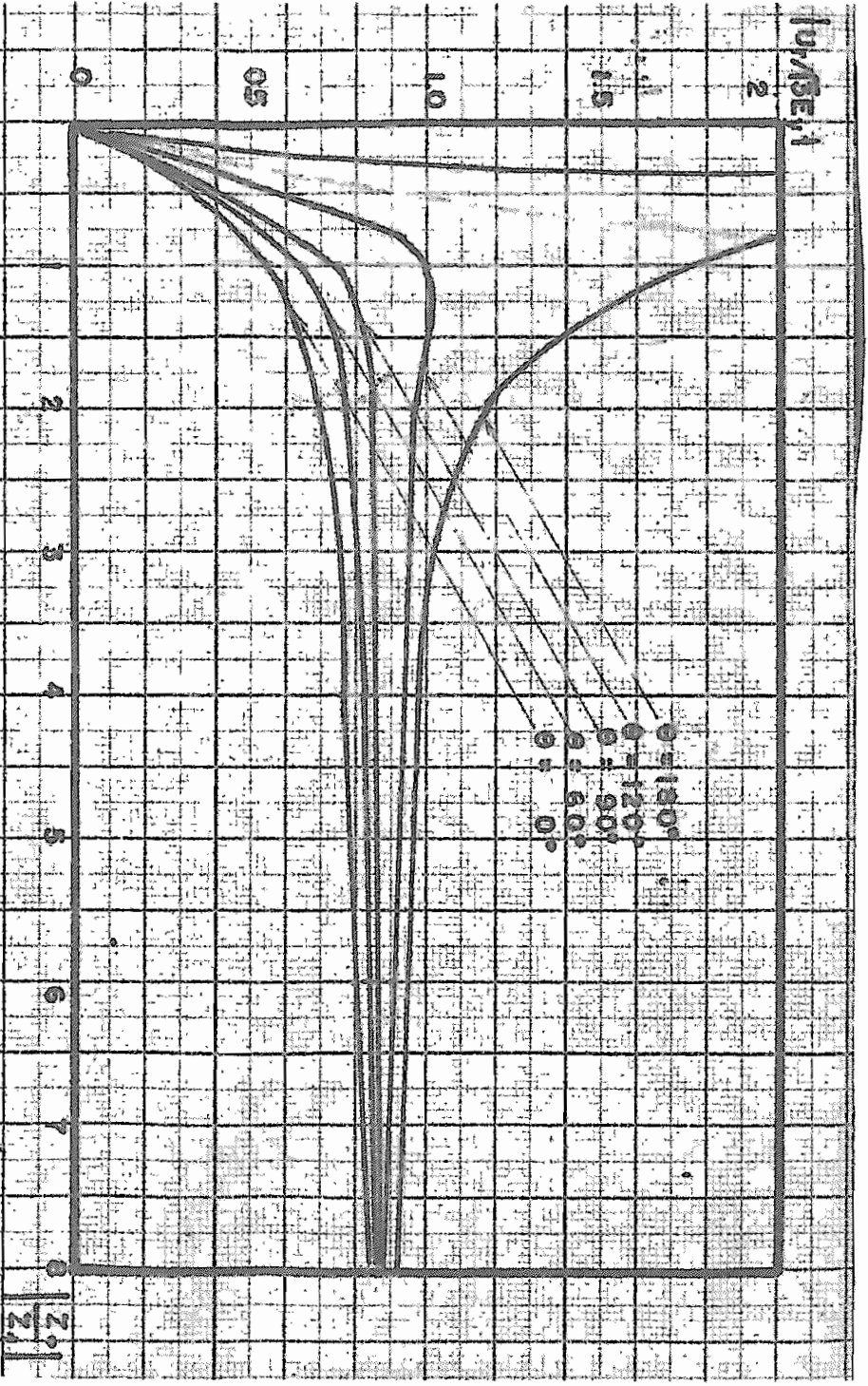


Fig. 4.13.- Comparación del voltaje de la fase sana (R) con respecto al voltaje de línea, en una falla bifásica, con contacto a tierra.

Y si como en la mayoría de los casos: $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$, se tiene:

$$\frac{\bar{I}_{cc(1\phi)}}{\bar{I}_{cc(3)}} = \frac{3}{2 + \bar{Z}_0/\bar{Z}_1}$$

Y como complejo : $\bar{I}_{cc(1\phi)}/\bar{I}_{cc(3)}$, será:

$$\frac{I_{cc(1B)}}{I_{cc(3)}} = \frac{3}{2 + |Z_0/Z_1| \cdot (\cos \Theta - j \sin \Theta)}$$

y el módulo de esta relación es:

$$\left| \frac{I_{cc(1B)}}{I_{cc(3)}} \right| = \frac{3}{\sqrt{4 + 4|Z_0/Z_1| \cdot \cos \Theta + |Z_0/Z_1|^2}}$$

Los valores correspondientes a esta relación, se dan en la siguiente tabla y el gráfico respectivo es el de la figura 4.14.

Θ \ $ Z_0/Z_1 $	0	1	2	4	6	8
0°	1.50	1.00	0.75	0.50	0.375	0.30
60°	1.50	1.13	0.87	0.57	0.42	0.33
90°	1.50	1.35	1.06	0.67	0.48	0.36
120°	1.50	1.73	1.50	0.87	0.61	0.41
180°	1.50	3.00	∞	1.50	0.75	0.50

Valores de $|I_{cc(1B)}/I_{cc(3)}|$, para diferentes valores de

Θ y $|Z_0/Z_1|$.

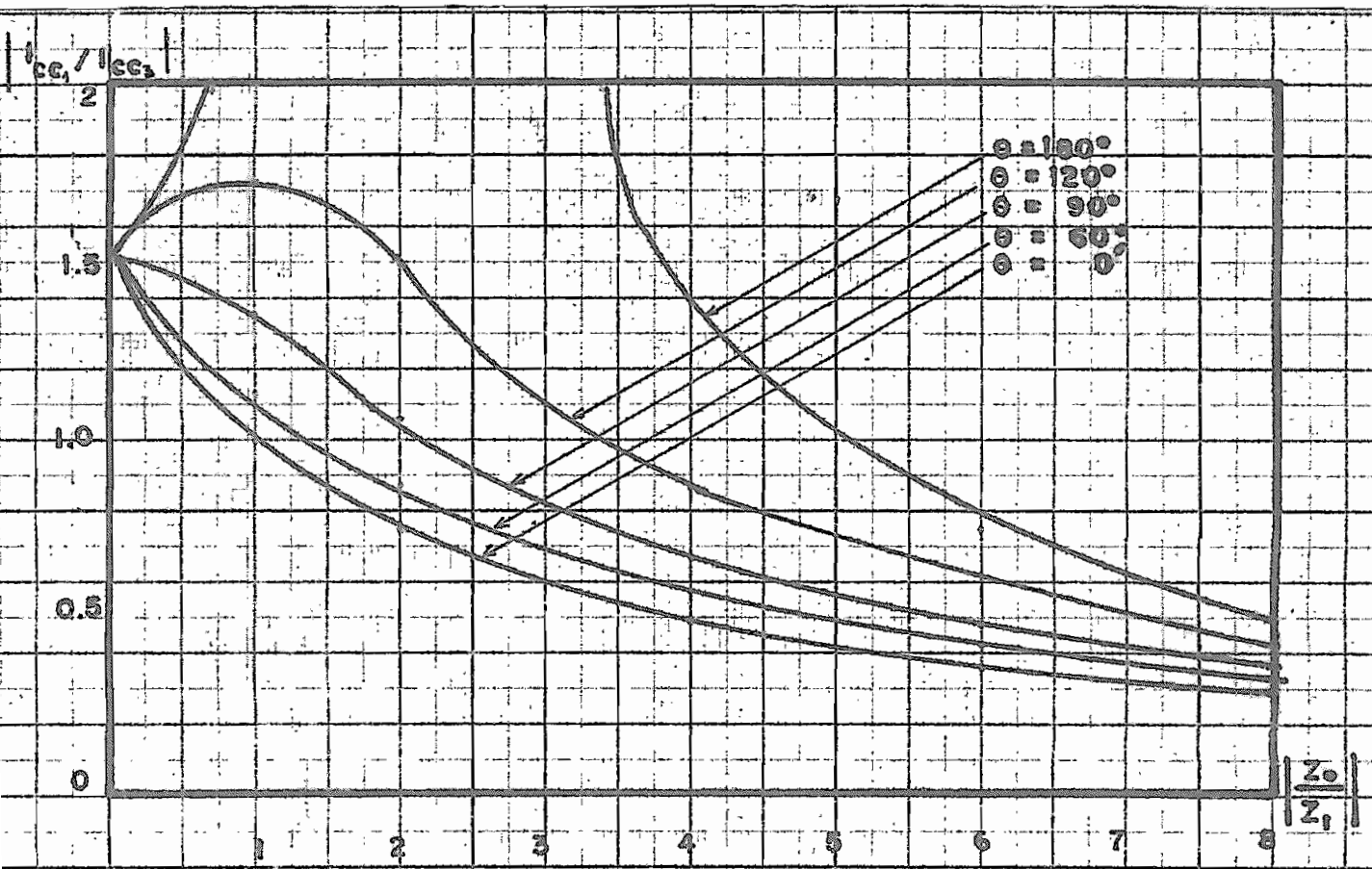


Fig. 4.14.- Comparación de la corriente de cortocircuito en una falla monofásica a tierra, con respecto a la corriente trifásica de cortocircuito.

IV.2.6.b.2.- Comparación del voltaje de las fases sanas con respecto al voltaje nominal de línea, para una falla monofásica a tierra:

Si las fases sanas son S y T, para cada una de ellas se tiene:

Para la fase S, según la Ec. 4.9, la relación $\bar{U}_S/\sqrt{3}\bar{U}_Y$:

$$\bar{U}_S / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(a^2 - \frac{\bar{Z}_0 + a^2 \cdot \bar{Z}_1 + a \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \right)$$

y para $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$:

$$\bar{U}_S / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(a^2 - \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1}{\bar{Z}_0 + 2 \cdot \bar{Z}_1} \right)$$

puesto que: $(a^2 + a) = -1$

Haciendo algunas transformaciones algebraicas y reemplazando el valor $a^2 = -0.5 - j \cdot \sqrt{3}/2$, se obtiene:

$$\bar{U}_S / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = -1/2 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_0 / \bar{Z}_1 + j \cdot (2 + \bar{Z}_0 / \bar{Z}_1)}{2 + \bar{Z}_0 / \bar{Z}_1}$$

y reemplazando los valores de \bar{Z}_0 y \bar{Z}_1 , por su valor complejo se llega a:

$$\bar{U}_S / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = -1/2 \cdot \frac{|Z_0/Z_1| \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \Theta + \operatorname{sen} \Theta)}{(2 + |Z_0/Z_1| \cdot \cos \Theta) - j \cdot |Z_0/Z_1| \cdot \operatorname{sen} \Theta}$$

$$-1/2 \cdot \frac{j |Z_0/Z_1| \cdot \cos \Theta - \sqrt{3} \cdot |Z_0/Z_1| \cdot \operatorname{sen} \Theta + 2}{(2 + |Z_0/Z_1| \cdot \cos \Theta) - j \cdot |Z_0/Z_1| \cdot \operatorname{sen} \Theta}$$

El módulo de esta relación es:

$$\left| \frac{U_S}{\sqrt{3} \cdot E_Y} \right| = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{|Z_0/Z_1|^2 \cdot (3 \cos \theta + \sin \theta)^2 + (2 - 3 |Z_0/Z_1| \sin \theta + \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cdot \cos \theta)^2}}{\sqrt{(2 + |Z_0/Z_1| \cdot \cos \theta)^2 + |Z_0/Z_1|^2 \cdot \sin^2 \theta}}$$

Los valores para esta relación dados en la siguiente tabla, están representados gráficamente en la Fig. 4.15.

$\theta \backslash Z_0/Z_1 $	0	1	2	4	6	8
0°	0.50	0.575	0.66	0.76	0.82	0.85
60°	0.50	0.38	0.50	0.68	0.78	0.83
90°	0.50	0.23	0.45	0.71	0.83	0.87
120°	0.50	0.00	0.50	0.87	0.94	0.97
180°	0.50	1.00	00	1.80	1.40	1.28

Valores de $\left| U_S / \sqrt{3} \cdot E_Y \right|$, para diferentes θ y $|Z_0/Z_1|$, para una falla monofásica a tierra.

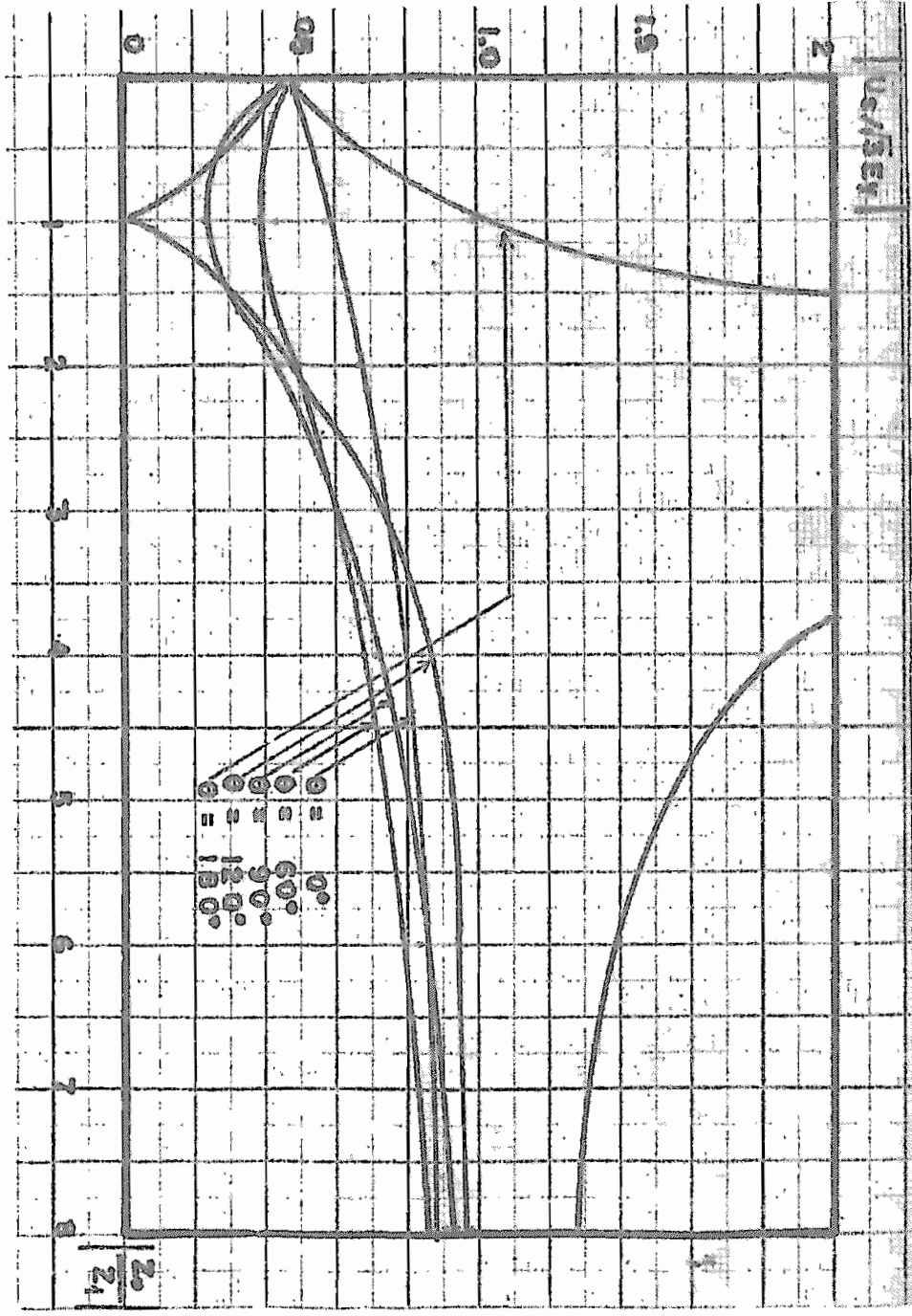


Fig. 4.15.-, Comparación de la tensión de la fase sin falla (S), con respecto a la tensión nominal de línea, para una falla monofásica a tierra.

Similarmente para la otra fase sana (T), de acuerdo a la ecu. 4.10, se tiene:

$$\bar{U}_T / \sqrt{3} \cdot \bar{E}_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(a - \frac{\bar{Z}_0 + a^2 \bar{Z}_1 + a^2 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \right)$$

y para $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$:

$$\bar{U}_T / \sqrt{3} \cdot \bar{B}_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a - \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1}{\bar{Z}_0 + 2\bar{Z}_1} \right)$$

y dando a "a", así como a \bar{Z}_0 y \bar{Z}_1 , sus correspondientes valores complejos:

$$\frac{\bar{U}_T}{\sqrt{3} \cdot \bar{B}_Y} = \frac{1}{2} \frac{\left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| (\sqrt{3} \cos \Theta - \text{sen } \Theta) - j \left(\left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cos \Theta + \sqrt{3} \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \text{sen } \Theta + 2 \right)}{\left(2 + \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cos \Theta \right) - j \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \text{sen } \Theta}$$

y el módulo de esta relación es:

$$\left| \frac{U_T}{\sqrt{3} \cdot B_Y} \right| = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\left| \frac{Z_0}{Z_1} \right|^2 (\sqrt{3} \cos \Theta - \text{sen } \Theta)^2 + \left(\left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cos \Theta + \sqrt{3} \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \text{sen } \Theta + 2 \right)^2}{\left(2 + \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right| \cos \Theta \right)^2 + \left| \frac{Z_0}{Z_1} \right|^2 \text{sen}^2 \Theta}}$$

Los valores correspondientes están dados en la siguiente tabla y graficados en la Fig. 4.16.

θ \ $ Z_0/Z_1 $	0	1	2	4	6	8
0°	0.50	0.58	0.66	0.77	0.82	0.86
60°	0.50	0.75	0.87	0.97	0.97	0.98
90°	0.50	0.87	1.02	1.09	1.08	1.07
120°	0.50	1.00	1.32	1.34	1.23	1.19
180°	0.50	1.00	00	1.80	1.40	1.25

Valores de $|U_T/\sqrt{3}E_T|$ para una falla monofásica a tierra para diferentes valores de θ y de $|Z_0/Z_1|$.

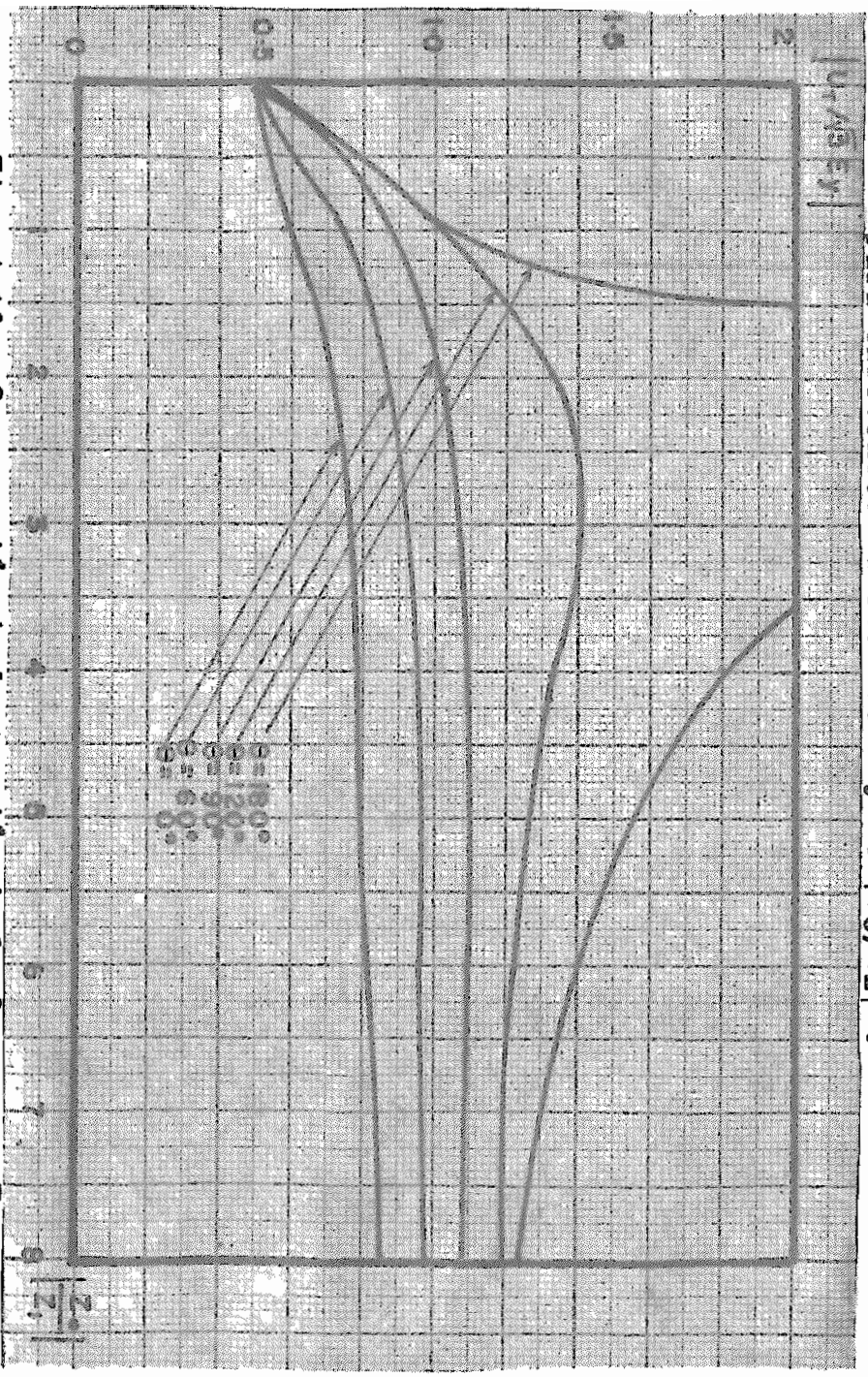


Fig. 4.16.— Comparación de la tensión de la fase sana T con respecto a la tensión de línea para una falla monofásica a tierra.

IV.3.-- COMPARACION DE LOS EFECTOS DE LAS CORRIENTES DE FALLA
A TIERRA PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE REDES:

La corriente de cortocircuito en una falla bifásica sin contacto a tierra, es para el caso general de $Z_1=Z_2$, siempre menor que la corriente de falla trifásica; sin embargo como se puede observar en las Figs. 4.12 y 4.14, las corrientes de corto circuito con contacto a tierra, pueden llegar a ser mayores que las corrientes de falla trifásica, al cumplirse ciertas condiciones impuestas por la relación Z_0/Z_1 y por el ángulo de desplazamiento entre estas dos impedancias (θ). En el presente acápite, se estudiarán cuales son justamente los valores de estos parámetros, para los diversos tipos de redes. Como se ve de las curvas arriba mencionadas, las corrientes de cortocircuito a tierra son pequeñas para valores grandes de Z_0/Z_1 y para valores pequeños de θ .

Los diagramas generalizados de impedancias, para las fallas monofásica y bifásica a tierra, son los indicados en las Figs. 4.17.

La impedancia de secuencia cero (Z_0), está compuesta por 3 ramas: Z_{0c} y Z_{0L} , siendo la primera la impedancia capacitiva a tierra de las líneas y la segunda la impedancia inductiva de puesta a tierra del sistema, que para redes con neutro aislado es infinito y para redes con neutro directamente conectado a tierra es cero, adoptando valores intermedios para los demás tipos de redes.

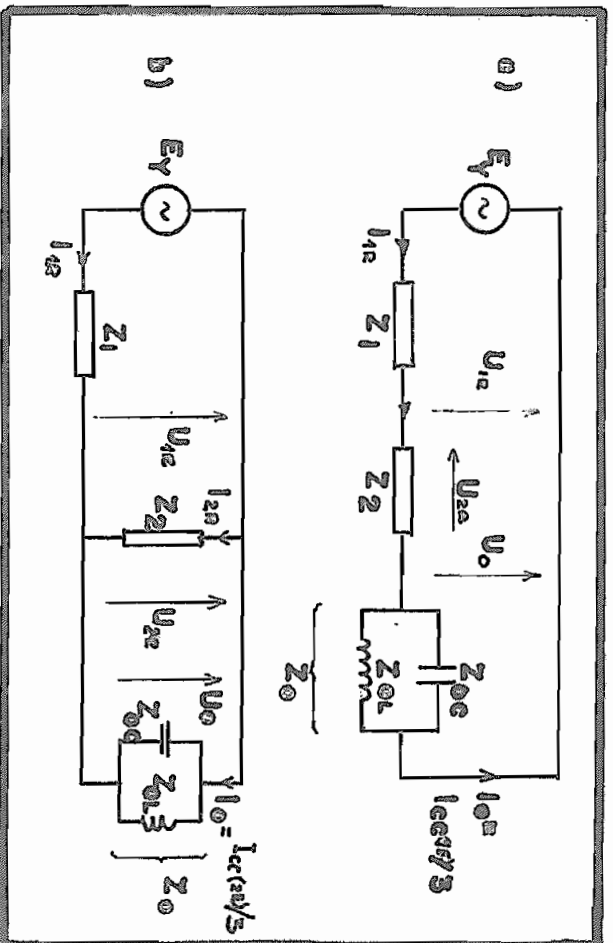


Fig. 4.17.- Diagramas generalizados de impedancias para:

a.- Falla monofásica a tierra.

b.- Falla bifásica con contacto a tierra.

El valor Z_{0L} encierra en sí también el valor de impedancia de secuencia cero del transformador (Z_{0T}) cuyo neutro se pone a tierra, a más de la impedancia de puesta a tierra (Z_B) o sea:

$$Z_{0L} = Z_{0T} + 3 \cdot Z_B$$

La impedancia de secuencia cero (Z_0), para los dos casos de falla es:

$$Z_0 = \frac{Z_{0L} \cdot Z_{0C}}{Z_{0L} + Z_{0C}}$$

Hc, 4, 11

Los valores relativos de Z_{0L}/Z_{0C} , varían según el tipo de red, por lo tanto es útil estudiar la variación de Z_0 , con forme varía dicha relación.

Los valores complejos de Z_{0L} y Z_{0C} son:

$$Z_{0C} = -j/\omega C_G$$

C_G = capacitancia a tierra de la línea, por fase.

$$Z_{0L} = j\omega L = j\omega L_{OT} + j3\omega L_G$$

$L = L_{OT} + 3L_G$ = inductancia del transformador más inductancia del sistema de conexión a tierra, por fase.

Para una red con el neutro aislado, la impedancia de secuencia cero, que para este tipo de red, se denominará Z_{0a} , es:

$$Z_{0a} = \frac{Z_{0C}}{1 + Z_{0C}/Z_{0L}} = Z_{0C} = -j/\omega C_G$$

ya que Z_{0L} es igual a infinito.

Los valores de Z_0 para los diferentes tipos de redes, serán comparados con respecto a este valor Z_{0a} ; en general se-

tiene que la relación de la impedancia de secuencia cero Z_0 , para cualquier tipo de red, con respecto a la impedancia de secuencia cero para redes con neutro aislado, es:

$$Z_0 = \frac{Z_{0L} + Z_{0C}}{Z_{0L} + Z_{0C}}$$

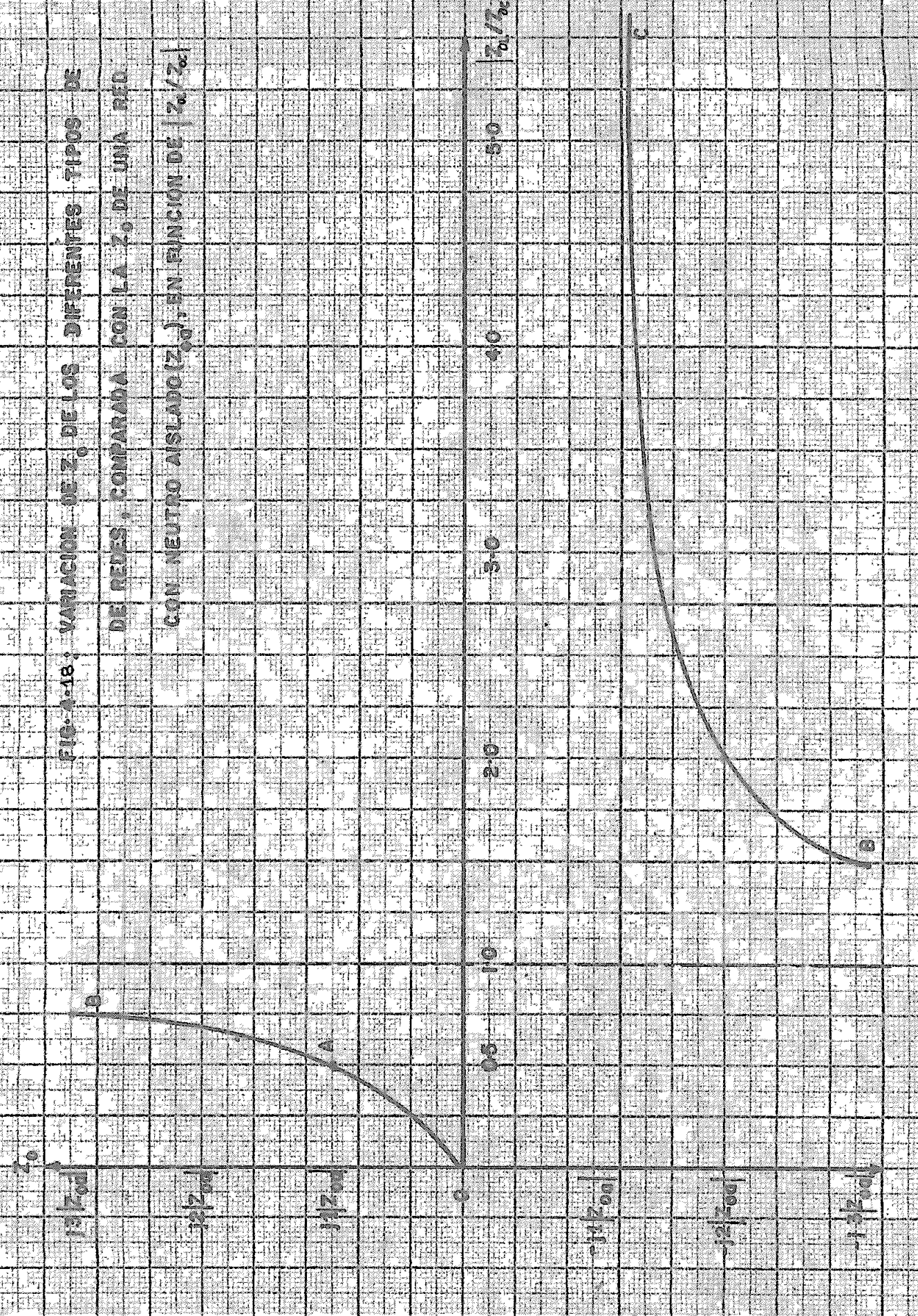
$$Z_0 = \frac{j\omega L_c (-j/\omega C_B)}{j\omega L_c - \frac{j}{\omega C_B}} = \frac{-j/\omega C_B}{1 - \frac{1}{\omega L_c} \cdot \frac{1}{\omega C_B}}$$

$$\bar{Z}_0 = -j \cdot |Z_{0a}| \left[\frac{1}{1 - \frac{1}{|Z_{0L}/Z_{0C}|}} \right]$$

Dando diferentes valores a la relación $|Z_{0L}/Z_{0C}|$, se pueden determinar los correspondientes a \bar{Z}_0 en función de $|Z_{0a}|$, como se indica en el siguiente cuadro y cuya representación gráfica corresponde a la Fig. 4.18.

$ Z_{0L}/Z_{0C} $	\bar{Z}_0	$ Z_{0L}/Z_{0C} $	\bar{Z}_0
0	0	7/8	$j.7.00 Z_{0a} $
1/8	$j.0.14 Z_{0a} $	1.00	$-j.00 \cdot Z_{0a} $
1/4	$j.0.33 Z_{0a} $	3/2	$-j.3.00 Z_{0a} $
3/8	$j.0.60 Z_{0a} $	2.00	$-j.2.00 Z_{0a} $
1/2	$j.1.00 Z_{0a} $	3.00	$-j.1.50 Z_{0a} $
5/8	$j.1.67 Z_{0a} $	5.00	$-j.1.25 Z_{0a} $
3/4	$j.3.00 Z_{0a} $	∞	$-j.1.00 Z_{0a} $

FIG. 1-18. VARIACION DE Z_0 DE LOS DIFERENTES TIPOS DE REDES, COMPARADA CON LA Z_0 DE UNA RED CON NEUTRO AISLADO (Z_{0i}), EN FUNCION DE $|Z_0/Z_{0i}|$.



En los párrafos inmediatos, se hace un estudio independiente para cada tipo de red, determinando qué valores de $|Z_{0L}/Z_{0C}|$ corresponden a cada uno de ellos, para de esta manera conocer los valores de Z_0 en función de la impedancia de secuencia cero de una red con neutro aislado.

IV.3.1.- Redes con neutro aislado:

Se ha tomado como magnitud de referencia para la elaboración de la curva de la Fig.4.18 el valor de la impedancia de secuencia cero, que presenta una red con neutro aislado ($Z_{0a}\emptyset$), por lo tanto vale ahora estudiar el comportamiento de este valor, con el fin de deducir el comportamiento de los demás tipos de red.

Como se explicó anteriormente, de las Figs. 4.12 y 4.14 se desprende que las corrientes de cortocircuito para fallas monofásicas y bifásicas a tierra son grandes en redes con una relación $|Z_0/Z_1|$ pequeña y con un ángulo θ grande. El ángulo θ grande (mayor que 90°) se presenta en el caso de tener una unión capacitiva a tierra, lo cual sucede justamente en las redes con neutro aislado, lo cual haría suponer que las corrientes de falla a tierra para este tipo de redes son grandes, sin embargo la relación $|Z_0/Z_1|$ es en este caso elevada, teniendo por lo general valores mayores que 5, con lo que según se puede ver en las Figs. antes mencionadas, las fallas monofásica y bifásica a tierra para $|Z_0/Z_1| > 5$ presentan corrientes menores que la falla trifásica. Por lo tanto en redes con neutro aislado, la máxima corriente de cortocircuito ocurre en la falla trifásica.

Puesto que $Z_L = \infty$, la relación $|Z_{OL}/Z_{OC}| = \infty$, y el valor correspondiente de Z_0 para esta relación, según la figura 4.18 es:

$$Z_0 = -j/\omega C_B = Z_{0a}$$

IV.3.2.- Redes con neutro a tierra por medio de bobinas de inductancia:

Para el presente caso, conviene considerar 4 posibilidades, según cual sea el valor de la impedancia inductiva de conexión a tierra, con respecto a la impedancia capacitiva de la línea a tierra (Z_{OC}).

IV.3.2a.- Primera posibilidad: $|Z_{OL}| = |Z_{OC}|$:

Para este caso - en que la relación $|Z_{OL}/Z_{OC}|$ es igual a 1, se ve en la figura 4.18, que el valor de Z_0 se hace teóricamente infinito, - por lo que obviamente este valor es superior al de impedancia de secuencia cero para redes con neutro aislado (Z_{0a}) y por lo tanto, la relación $|Z_0/Z_1|$ para estas redes es también superior que para las redes del caso anterior y consecuentemente, las corrientes de cortocircuito para fallas monofásicas y bifásicas a tierra son menores que la corriente de cortocircuito trifásico (Figs. 4.12 y 4.14).

Esto puede también demostrarse analíticamente:

$$I_{cc}(1\phi) = \frac{3}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \cdot V_Y$$

$$\lim_{Z_0 \rightarrow \infty} I_{cc(1E)} = \frac{3EY}{\infty} = 0$$

$$I_{cc(2E)} = \frac{3 \cdot Z_2}{Z_0 \cdot Z_1 + Z_0 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot EY$$

$$\lim_{Z_0 \rightarrow \infty} I_{cc(2E)} = \frac{3 \cdot Z_2 \cdot EY}{\infty} = 0$$

Naturalmente que estos valores de $I_{cc(1E)}=0$, $I_{cc(2E)}=0$ son teóricos, ya que en realidad, como se explicó anteriormente en el acápite correspondiente, los valores de corriente de cortocircuito a tierra para este tipo de redes, no son exactamente iguales a cero, sino que existe una pequeña porción de corriente que circula por el sitio de falla y que es la corriente residual, ocasionada por la imposibilidad de conseguir un desplazamiento exacto de 180° entre la corriente inductiva y la capacitiva. Pero en todo caso, las corrientes de falla a tierra, tanto monofásica como bifásica, son menores que la corriente de falla trifásica.

IV.3.2.b.- Segunda posibilidad: $|Z_{oL}| > |Z_{oc}|$:

Esta desigualdad,

se puede expresar también de la siguiente forma:

$$1 < |Z_{oL} / Z_{oc}| < \infty$$

Esta condición corresponde al tramo B-C, de la curva de la Fig. 4.18, para el cual los valores de Z_0 de la red considerada son mayores que Z_{0a} , además Z_0 es de carácter capacitivo. Al ser $Z_0 > Z_{0a}$, la relación $|Z_0/Z_1|$, para este caso; será también mayor que para una red con neutro aislado, de donde se deduce que las corrientes de cortocircuito para fallas monofásicas y bifásicas a tierra, son menores que las corrientes para cortocircuito trifásico, siendo esta última por lo tanto la máxima corriente de falla.

IV.3.2.c.- Tercera posibilidad: $0.5 |Z_{oc}| < |Z_{oL}| < |Z_{oc}| :$

Esta

condición, se puede escribir también:

$$0.5 < |Z_{oL} / Z_{oc}| < 1$$

En la Fig. 4.18, este caso corresponde al tramo A-B, en el que se puede ver que el valor de Z_0 es también mayor que Z_{0a} , siendo sin embargo de carácter inductivo. Al ser Z_0 mayor que Z_{0a} , la relación $|Z_0/Z_1|$, será también mayor que para el caso de una red con neutro aislado y por lo tanto los valores de corriente de cortocircuito monofásico y bifásico con contacto a tierra, serán menores que para una falla trifásica.

IV.3.2.d.- Cuarta posibilidad: $0 < |Z_{oL}| < 0.5 |Z_{oc}| :$

Que puede

ser expresada también así:

$$0 < |Z_{oL} / Z_{oc}| < 0.5$$

Esta condición corresponde al tramo O-A de la Fig. 4.13 y como se puede observar, Z_o es menor que Z_{oa} y además tiene carácter inductivo, o sea que θ es menor que 90° , con lo que las altas corrientes de cortocircuito ocasionadas por los ángulos θ grandes, quedan descartadas para este caso; sin embargo debido a que $Z_o < Z_{oa}$, pueden tenerse valores de $|Z_o/Z_1|$ menores que 5 y por lo tanto de las Figs. 4.12 y 4.14 se puede observar que las corrientes de cortocircuito monofásico y bifásico con contacto a tierra pueden ser mayores que la corriente de falla trifásica. De estas mismas curvas, se deduce que para $\theta < 90^\circ$, los valores de corriente para la falla bifásica son algo mayores que para la falla monofásica.

IV.3.3.- Redes con el neutro directamente conectado a tierra:

Al ir haciendo cada vez más pequeño el valor de la impedancia de conexión a tierra, se llega a tener $Z_B = 0$, que es el caso de poner directamente el neutro a tierra, ya que la impedancia de secuencia cero del transformador con respecto a tierra es también pequeña, y por lo tanto:

$$Z_{oL} = Z_{oT} + 3.Z_B \approx 0$$

con lo que:

$$|Z_{oL}/Z_{oc}| \approx 0$$

Para esta condición, en la Fig. 4.18, se tiene que $Z_0=0$ aunque en la realidad se consiguen valores de $|Z_0/Z_1|=0.5$, siendo sin embargo Z_0 de carácter inductivo (θ menor que 90°),

Por estas consideraciones, las altas corrientes de cortocircuito debidas a los ángulos θ grandes no se presentan en este caso, pero debido a que $|Z_0/Z_1|$ es pequeño pueden presentarse valores de corriente de cortocircuito para fallas monofásicas a tierra, que son hasta 30% mayores que la corriente para una falla trifásica y hasta 50% mayores que para la falla bifásica con contacto a tierra.

IV.3.4.- Conclusión:

De lo expuesto se deduce que: en redes con neutro aislado y en aquellas conectadas a tierra por medio de bobinas Petersen de alto valor inductivo (siempre que $0.5 < |Z_L/Z_C| < \infty$) la mayor corriente de cortocircuito ocurre en la falla trifásica. En cambio en redes conectadas directamente a tierra o por medio de bobinas de bajo valor inductivo ($0 < |Z_L/Z_C| < 0.5$) la máxima corriente de cortocircuito puede ocurrir en la falla monofásica o bifásica con contacto a tierra.

CAPITULO QUINTO

DISEÑO DE LAS INSTALACIONES

DE CONEXION A TIERRA PARA

LINEAS AEREAS

V.1.- LINEAS CON ALTA RESISTENCIA DE CONEXION A TIERRA

V.1.1.- Potenciales Permitidos de los Electrodo de conexión a tierra:

Para redes con neutro aislado o conectado a tierra por medio de bobinas de inductancia, el potencial del electrodo de conexión a tierra (U_E) no debe tener un valor superior a 125 voltios. Este valor depende proporcionalmente del valor de la corriente de cortocircuito a tierra (I_{CC}), tómese en cuenta que este valor de I_{CC} para el caso de una red con bobinas de inductancia queda reducido solamente a la corriente residual y para redes con neutro aislado tal valor viene impuesto casi exclusivamente por la capacitancia a tierra de las líneas.

Lo importante es entonces, que para que se mantenga un valor determinado de U_E , será necesario que el cociente $U_E/I_{CC} = Z_r$, no sobre pase un valor determinado.

Para el caso de redes con neutro aislado debe ser:

$$Z_r \leq \frac{125 \text{ V.}}{I_{CC} \text{ a tierra}} = U_E/I_{CC} \quad \text{Ec. 5.1}$$

y para redes con neutro tierra por medio de bobinas de inductancia:

$$Z_r \leq \frac{125 \text{ V.}}{I \text{ residual}} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Estos valores son sin embargo, considerados solamente para los casos en que los sistemas de conexión a tierra de -

los lados de alta y baja tensión de una línea, estén convenientemente separados formando sistemas independientes entre sí. Pero en una gran parte de los casos resulta difícil hacer tal separación de las instalaciones de conexión a tierra, esto significa que tanto para alta como para baja tensión se utiliza una instalación común.

Según las normas VDE, el potencial del electrodo de conexión a tierra para instalaciones con tensiones superiores a 1 KV es 125 V y para tensiones inferiores a 1 KV es 65 V. para tales valores de potencial del electrodo los valores de tensión de paso y contacto serán solo a una fracción de ellos. Se toman dos valores diferentes de U_g para alta y baja tensión, considerando que las instalaciones de alta están generalmente cerradas al acceso público y son transitadas solamente por personal especializado, mientras que las instalaciones de baja tensión están la alcance de personas sin ninguna noción del peligro de una instalación eléctrica puede ocasionar, y por esta razón el potencial del electrodo de conexión a tierra y por lo tanto también las tensiones de contacto y de paso deben ser lo más bajas posibles ($U_g = 65$ V), esto es también válido para las proximidades de las instalaciones de alta tensión que pueden ser libremente transitadas (caminos, terrenos, etc.) y en los que los valores de tensión de paso y de contacto deben ser más bajos que dentro de los terrenos de la instalación.

Con estas consideraciones, se puede deducir que para redes en las que no se pueden separar las instalaciones de co-

nección a tierra de alta y baja tensión, habrá que adaptar un valor del potencial del electrodo de conexión a tierra, $U_d = 65V.$, con previsión de seguridad para el lado de baja-tensión. Correspondientemente, los valores de Z_r serán:

Para redes con neutro aislado:

$$Z_r \leq \frac{65 \text{ V.}}{I_{cc} \text{ a tierra}} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Para redes con bobina de inductancia:

$$Z_r \leq \frac{65 \text{ V.}}{I \text{ residual}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

V.1.2.- Influencia del hilo de guarda:

El hilo de guarda utilizado en las líneas de transmisión con el objeto de protegerles contra descargas atmosféricas, influye de manera substancial en el valor de las resistencias de conexión a tierra de las torres de las líneas. Los hilos de guarda sobre postes de madera van conectados a tierra de ser posible en cada poste o por lo menos cada 300 metros.

El hilo de guarda forma con la resistencia a tierra de las torres y con la resistencia del suelo, una cascada, como se representa en la Fig. 5.1.

Considerando puramente la línea de transmisión y despreciando la resistencia del camino de retorno por tierra, se-

puede calcular que la impedancia vista en los terminales extremos de la cascada, es prácticamente independiente de la longitud de la misma y es igual a:

$$Z_L \approx \sqrt{r \cdot R} \quad \text{Ec. 5.5}$$

siendo: R = resistencia de conexión a tierra de las torres ,
 medida con el hilo de guarda levantado
 r = resistencia del hilo de guarda en cada vano.

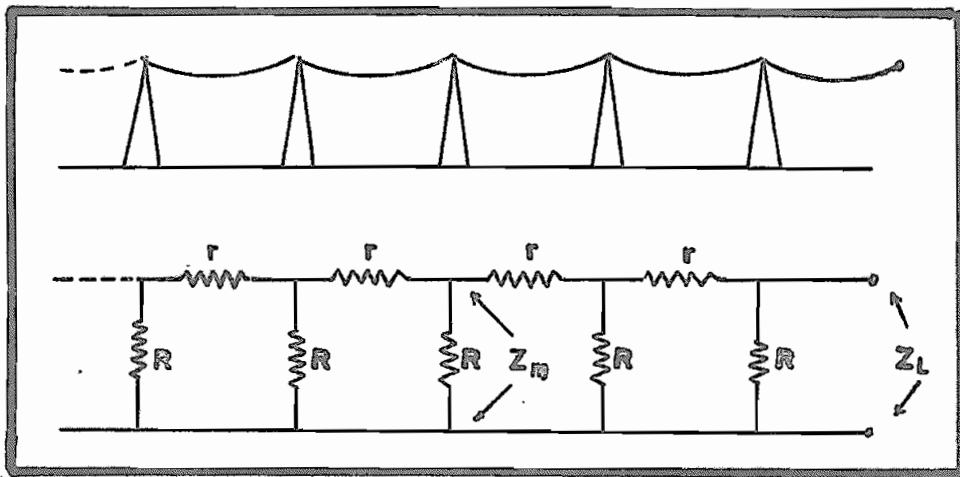


Fig. 5.1.- Cascada de resistencias formada por el hilo de guarda y la resistencia de puesta a tierra de las torres.

Considérese ahora la resistencia que existiría en el centro de la mencionada cascada, esta resistencia será:

$$Z_m = Z_L / 2$$

Siendo la corriente de falla I_{cc} , el potencial del elec

trodo de la torre sería: $I_{cc} \cdot Z_L / 2$ si toda la corriente I_{cc} - fuera conducida a tierra a través de la estructura de tierra de la torre; sin embargo esto no es cierto, ya que solamente una fracción de I_{cc} es conducida a tierra por la torre y la parte restante es conducida por el hilo de guarda, como se in dica en la Fig. 5.2.

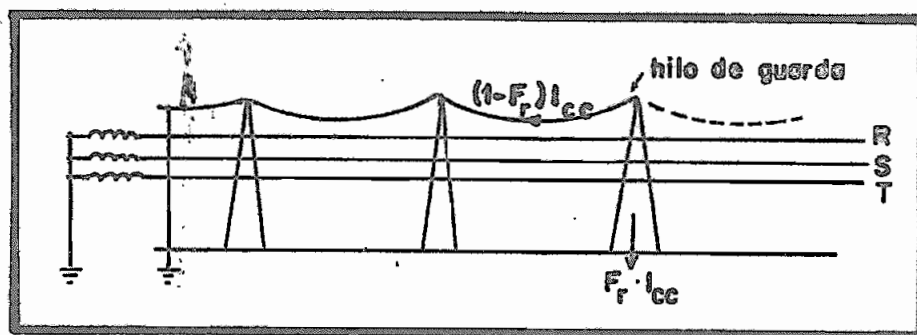


Fig. 5.2.- Ilustración del factor de reducción de los hilos de guarda.

La fracción de I_{cc} que es conducida a tierra, viene dada por un factor $F_r < 1$, llamado factor de reducción o "factor de hilo de guarda" y depende del material del hilo.

En la tabla siguiente, se dan algunos valores del factor de reducción F_r , para distintos materiales de hilo de guarda.

TIPO DEL HILO DE GUARDA	AREA DE LA SECCION (mm ²)	FACTOR DE REDUCCION
Acero-Aluminio	300/500	0.61
Acero-Aluminio	240/40	0.62
Acero-Aluminio	44/32	0.77
Bronce	50	0.75
Bronce	70	0.69
Acero	50	0.99
Acero	70	0.98
Acero-Cobre (40%)	50	0.84
Acero-Cobre (40%)	70	0.78

El potencial a tierra de la torre, será:

$$U_E = F_r \cdot I_{cc} \cdot Z_L / 2$$

de donde:

$$U_E / I_{cc} = F_r \cdot Z_L / 2 = Z_r$$

$$Z_r = U_E / I_{cc} = F_r \cdot \frac{\sqrt{R \cdot r}}{2} = \frac{\text{potencial del electrodo}}{I \text{ falla a tierra}}$$

Ec. 5.6

Para un vano determinado el valor de "r" es conocido, a sí como el valor F_r , para un determinado material del hilo de guarda, entonces lo que interesa saber es cual debe ser el valor de R, o sea la resistencia de conexión a tierra de-

la torre, para que se mantenga una relación determinada -
 U_E/I_{CC} ; o sea:

$$R = \frac{1}{F} \cdot \left(2 \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{U_E}{I_{CC}} \right)^2 \quad \text{Ec. 5.7}$$

Sea por ejemplo de calcular cual debe ser la resistencia de conexión a tierra para una torre de una línea, de tal forma que el potencial de conexión a tierra del electrodo de la torre, no sobrepase un valor U_E de 125 V., sabiendo que se trata de una red con el neutro conectado a tierra por medio de una bobina de inductancia (cuya bobina de inductancia) y que la corriente residual de cortocircuito es 125 amperios y que la línea de guarda es de hilo de acero de 70 mm², siendo el vano promedio de 250 metros.

La resistencia del hilo de guarda, puede ser consultada de cualquier manual, para este caso específico de un hilo de acero de 70 mm² y de 250 m., la resistencia es:

$$r = 1.03 \text{ ohmios.}$$

$$F_r = 0.98$$

$$U_E = 125 \text{ V.}$$

$$I_{CC} = 125 \text{ A.}$$

por lo tanto:

$$R = \frac{1}{1.03} \cdot \left(\frac{2}{0.98} \cdot \frac{125}{125} \right)^2 = 4 \text{ ohmios.}$$

o sea que la resistencia de conexión a tierra de la torre, de

be ser de 4 ohmios, con el hilo de guarda levantado, si este valor no se consigue solamente con el bloque de fundamento, habrá que añadir los electrodos necesarios con el fin de con seguir este valor.

V.1.3.- Incidencia de las descargas atmosféricas:

Se ha observado que en líneas sin hilo de guarda, el voltaje ocasionado por una descarga atmosférica, puede acarrear elevaciones de tensión en los conductores de fase de la línea que llegan a ser hasta 20 veces superiores a la tensión nominal. Este aumento de voltaje depende de la intensidad en amperios de la descarga y de la impedancia del circuito a través del cual - circula la onda.

Si un rayo, cae directamente en una fase de una línea - sin hilo de guarda, una pequeña corriente de rayo, actuando sobre la impedancia de la línea será suficiente para ocasionar un aumento de potencial capaz de vencer el nivel de aislamiento de los aisladores. Si la línea por el contrario es tá provista de un hilo de guarda y el rayo cae directamente en él, el camino de recorrido de la corriente del rayo presenta una impedancia mucho menor, requiriéndose por lo tanto una corriente mayor para producir una sobreelevación de voltaje capaz de romper el nivel de aislamiento de la línea.

El hilo de guarda, desempeña dos funciones principales; la primera es la de impedir que el rayo llegue directamente a los conductores de la línea, interponiéndose en su camino,

y la segunda es la de distribuir la corriente del rayo en varios caminos, de tal forma que se reducen las sobreelevaciones de tensión.

De estas consideraciones se deduce que para que los hilos de guarda sean efectivos, es necesario que el o los hilos apantallen a todos los conductores de línea, que la resistencia de puesta a tierra sea baja y que el nivel de aislamiento sea relativamente elevado.

En general es pues necesario que al presentarse una descarga atmosférica en cualquier parte de una instalación eléctrica puesta a tierra (hilo de guarda, postes, torres, (postes), hilos para el tensado de cables, etc.), la corriente del rayo sea desviada a tierra sin que en tales partes de la instalación y en las líneas de transmisión, se produzcan tensiones de choque capaces de producir perforaciones en los aisladores.

Las perforaciones en los aisladores, se evitarán siempre que la sobreelevación de tensión no sobrepase el nivel básico de aislamiento, o sea si:

$$I_R \cdot Z_s \leq U_{ch} \quad \text{Ec. 5.8}$$

siendo:

I_R = corriente del rayo (valor de cresta)

Z_s = impedancia de difusión de choque del electrodo

de puesta a tierra de la parte de la instalación -
sujeta a la acción del rayo (torres, hilos de guarda
da, etc.).

U_{ch} = tensión de choque que soporta el aislamiento de la
línea.

La impedancia de difusión de choque difiere de la resista
tencia de difusión R medida por los métodos convencionales -
indicados en el acápite III.5 especialmente para aquellos e-
lectrodos de gran extensión y colocados en terrenos malos -
conductores. Sin embargo para electrodos de dimensiones me-
dianas y pequeñas como por ejemplo: bases de torres o postes,
electrodos de barra de hasta 10 metros de largo, electrodos-
de placa, electrodos radiales cuyos radios no sean mayores -
de 20 metros, puede tomarse la impedancia de difusión de choq
que (Z_s) igual a la resistencia de difusión (R) medida por -
los métodos convencionales.

En líneas con hilo de guarda debe medirse la resistencia
de difusión de las torres, con el hilo de guarda levantado
do.

De las anteriores consideraciones se deduce que la impeda
ncia de difusión de choque permisible (Z_s per.) debe ser ig
ual a:

$$Z_s \text{ per} = U_{ch}/I_R \quad \text{Ec. 5.9}$$

Ahora bien, U_{ch} viene dado por las características de -

los aisladores, mientras que la magnitud de la intensidad - máxima de la corriente del rayo (I_R) varía según la localidad geográfica.

Según mediciones realizadas por la Sociedad Alemana de Estudios para Instalaciones de Alto Voltaje se ha determinado el siguiente cuadro que indica el porcentaje de rayos de un número determinado de experimentaciones, que no sobrepasan los valores de corrientes indicados.

79%	de los rayos no sobrepasan	20 KA.
91%	" " " " "	30 KA.
95%	" " " " "	40 KA.
98%	" " " " "	50 KA.
99%	" " " " "	60 KA.

De la misma manera según mediciones realizadas en Estados Unidos por Gross y Lippert, en 11 líneas correspondientes a 5 sistemas con tensiones nominales comprendidas entre 66 y 220 KV. , de los años 1.933 a 1.943, con un total de 2.721 rayos observados, se ha llegado al siguiente cuadro:

22,60%	de los rayos no sobrepasan	5 KA.
52,60%	" " " " "	10 "
74,10%	" " " " "	20 "
85,10%	" " " " "	30 "
94,20%	" " " " "	40 "
97,20%	" " " " "	50 "

98,40%	de los rayos no sobrepasan	60	KA.
99,17%	" " " " "	70	"
99,35%	" " " " "	80	"
99,60%	" " " " "	90	"
99,78%	" " " " "	100	"
99,80%	" " " " "	110	"
99,82%	" " " " "	120	"
99,83%	" " " " "	130	"

Según la seguridad que se quiera dar a la instalación, será de escoger el valor correspondiente a la corriente máxima del rayo, haciendo siempre hincapié en que los datos varían según la localización geográfica. Así por ejemplo si se quiere diseñar una instalación con el 94% de seguridad de que la corriente del rayo no va a ocasionar una sobretensión superior a la permisible de los aisladores, habrá que escoger una corriente de rayo $I_R = 40$ KA. (según los datos que se detallan en las tablas anteriores), osea que la resistencia de difusión de choque permisible, serán en este caso:

$$Z_s \text{ per} = U_{ch}(KV)/40(KA)$$

Si este mismo problema se lo observa desde otro punto de vista, osea como obtener una seguridad determinada, lo que implica determinar la máxima corriente de rayo permisible, se puede escribir:

$$I_R \text{ per. máx.} = U_{ch} / Z_s \quad \text{Ec. 5.10}$$

con lo que se tienen dos parámetros a variar, que son: Z_g y U_{ch} . Mientras más alto sea el nivel de aislamiento del sistema, así como más baja sea la impedancia de difusión de choque, más grande será el valor permisible de la corriente del rayo y por lo tanto más seguridad tendrá la línea; de tal modo que se presentan dos posibilidades de conseguir máxima seguridad: a) aumentar el nivel de aislamiento, añadiendo aisladores, b) disminuir la resistencia de difusión de puesta a tierra de las torres. Se puede decir que existe un compromiso en la variación de las dos magnitudes, que tiene que resolverse desde el punto de vista económico, o sea que habrá que pesar si resulta más conveniente bajar la resistencia o aumentar el aislamiento. La experiencia ha demostrado sin embargo que se llega a una solución económica al conseguir una resistencia de difusión de las torres de 10 ohmios, medida con el hilo de guarda levantado, antes que aumentar aislamiento.

La determinación del nivel de aislamiento, queda fuera del alcance del presente estudio, por lo tanto, se dará especial importancia a la manera de disminuir la impedancia Z_g , suponiendo conocido y determinado el valor de U_{ch} .

En caso de que no se consiga un valor adecuado de Z_g sólo con la base de la torre, será necesario añadir electrodos para bajar dicho valor, siendo los más usados, los llamados conductores de contrapeso y los electrodos en forma de barra introducidos alrededor de las torres y conectados a éstas. Cabe anotar que estos últimos, pueden ser utilizados solamente

en terrenos libres de rocas, ya que la presencia de éstas impide de la introducción de los mismos.

IV.1.3.a.- Conductores de Contrapeso:

Los conductores de contrapeso se utilizan principalmente en terrenos de alta resistividad, ya que para estas condiciones son más efectivos que los electrodos de barras. Con los conductores de contrapeso además de obtener una disminución de la resistencia de difusión, se consigue una disminución de la diferencia de potencial entre los conductores de línea y el hilo de guarda, debido a la inducción mutua entre ellos y los conductores de contrapeso, esto sin embargo es válido, sólo para los conductores de contrapeso que van en el suelo paralelos a la línea, mientras que los conductores de contrapeso radiales sólo tienen el objeto de reducir la resistencia de difusión. Se ha determinado experimentalmente que para terrenos de no muy alta resistividad basta instalar una línea de contrapeso sólo en una porción de la distancia entre torres, sin embargo en terrenos de alta resistividad es necesario prolongar la línea a toda la distancia del vano.

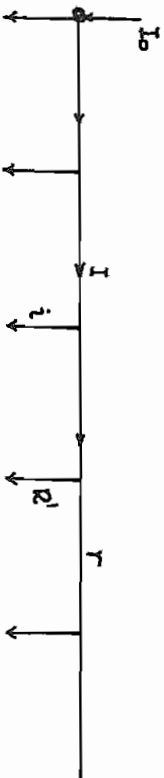
Un conductor de contrapeso tiene una impedancia de difusión de choque inicial muy alta, que depende en mucho de las características del suelo, pero conforme la corriente se desplaza a lo largo del conductor esta impedancia disminuye llegando a tener finalmente el valor de la impedancia de difusión (R) calculada por los métodos convencionales. El valor de la impedancia de difusión de choque para un electrodo

de contrapeso es en promedio de 150 a 200 ohmios.

Resistencia de difusión (R) e impedancia de difusión de cho-
que (Z_g) para conductores de contrapeso de gran longitud:

1.- Resistencia de Difusión (R):

En los análisis que se han hecho en el capítulo III, se han considerado electrodos de longitudes reducidas o sea aquellos en los que el potencial es uniforme a lo largo de toda su longitud; sin embargo en electrodos de gran longitud, la corriente que circula a través de ellos, sufre una atenuación ocasionada por la resistencia interna del electrodo antes de irradiarse hacia la resistencia del suelo, o sea que habrá un drenaje de corriente a lo largo del electrodo, de tal forma que dicha corriente no es constante en toda la longitud del electrodo.



Sea un electrodo de contrapeso, como el que está representado en la figura anterior, en la que:

I_0 = corriente que entra por el extremo inicial del electrodo (amperios).

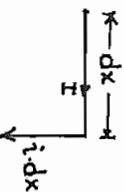
i = corriente que se difunde al suelo por cada metro (amperios/metro).

r = impedancia interna del electrodo por unidad de longitud, (ohmios/metro).

R' = resistencia de puesta a tierra del conductor de con trapeso, calculada por el método convencional (Ω -m.)

I = corriente en un sitio x del conductor.

En un elemento infinitesimal del conductor, se tiene:

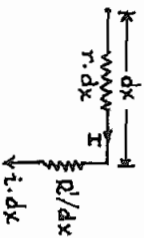


siendo: I la corriente en el elemento dx , e $i \cdot dx$ la corriente que se desvía a tierra.

Según la ley de Kirchoff de corrientes, debe cumplirse:

$$I + i \cdot dx = 0 \implies dI/dx + i = 0$$

Por otra parte en el mismo elemento dx , se observa que éste tiene una impedancia $r \cdot dx$, y a su vez la resistencia del suelo que provoca la fuga de corriente en el elemento dx será R'/dx , teniéndose el siguiente diagrama:



La suma de voltajes debe ser cero, o sea:

$$I \cdot (r \cdot dx) + (i \cdot dx)(R'/dx) = 0$$

$$r \cdot I + R' \cdot di/dx = 0$$

De esta forma se tiene un sistema de dos ecuaciones:

$$i + dI/dx = 0$$

$$R'.di/dx + r.I = 0$$

de la segunda ecuación se obtiene: $di/dx = - I.r/R'$

y derivando la primera ecuación: $d^2I/dx^2 = 0$

de donde: $d^2I/dx^2 - I.r/R' = 0$

resolviendo esta ecuación diferencial, se puede determinar el valor de I en función de x .

Sea: $I = e^{\lambda x}$, con lo que la ecuación diferencial se transforma en:

$$\lambda^2 \cdot e^{\lambda x} - e^{\lambda x} \cdot r/R' = 0$$

y: $\lambda^2 = r/R' \quad \lambda = \pm \sqrt{r/R'}$

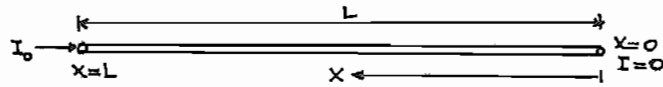
$$\lambda_1 = \sqrt{r/R'} \quad \lambda_2 = -\sqrt{r/R'}$$

de donde:

$$I = A_1 \cdot e^{\lambda_1 x} + A_2 \cdot e^{\lambda_2 x} = A_1 \cdot e^{\lambda_1 x} + A_2 \cdot e^{-\lambda_1 x}$$

Hay que fijar las condiciones iniciales, con el fin de determinar los valores de A_1 y A_2 ; para facilidad considérese

que x varía desde cero desde el extremo contrario a aquel por donde entra la corriente I_0 , como se indica a continuación:



al fin del conductor, se considera que la corriente, se ha -
brá atenuado completamente, siendo entonces las condiciones:

$$\text{Para } x = L ; I = I_0$$

$$x = 0 ; I = 0$$

de donde:

$$I_0 = A_1 \cdot e^{\lambda_1 L} + A_2 \cdot e^{-\lambda_1 L} = 0$$

$$0 = A_1 + A_2$$

$$A_1 = -A_2$$

$$I_0 = A_1 \cdot (e^{\lambda_1 L} - e^{-\lambda_1 L})$$

$$A_1 = I_0 / (e^{\lambda_1 L} - e^{-\lambda_1 L}) = -A_2$$

luego:

$$I = A_1 \cdot (e^{\lambda_1 x} - e^{-\lambda_1 x}) = I_0 \cdot \frac{e^{\lambda_1 x} - e^{-\lambda_1 x}}{e^{\lambda_1 L} - e^{-\lambda_1 L}}$$

$$I = I_0 \cdot \text{Senh } \lambda_1 x / \text{Senh } \lambda_1 L$$

y si en general se llama: $\lambda = \sqrt{r/R'}$, se tiene:

$$I_x = I_0 \frac{\text{Senh } \lambda x}{\text{Senh } \lambda L} \quad \text{Ec. 5.11}$$

y puesto que $i = -dI/dx$:

$$i = I_0 \frac{\text{Cosh } \lambda x}{\text{Senh } \lambda L} \quad \text{Ec. 5.12}$$

Para pequeños valores de r o de L , se tiene que el producto $\lambda L = L \cdot \sqrt{r/R'}$ es pequeño, y por lo tanto:

$$\text{Senh } \lambda L \cong \lambda L \quad ; \quad \text{Cosh } \lambda L \cong 1$$

de donde:

$$I = I_0 \cdot x/L$$

$$i = I_0/L$$

o sea que la corriente en el conductor decrece linealmente - con la distancia x y la corriente lineal de difusión a tierra (i) se distribuye uniformemente a lo largo de L .

Para valores grandes de r o de L , se tiene:

$$\text{Senh } \lambda x \cong \text{Cosh } \lambda x \cong e^{\lambda x}/2$$

excluyendo para puntos cercanos a $x=0$ y para $x=L$.

con lo cual:

$$I = I_0 \cdot e^{kx/e \lambda I}$$

$$i = \lambda I$$

La resistencia de difusión del electrodo (R) viene dada por la relación del potencial ξ a la corriente que entra al electrodo (I_0); siendo el potencial ξ igual a la caída de tensión ocasionada por la corriente inicial de difusión a tierra (i_0) en la resistencia R' , o sea:

$$R = \xi/I_0 = R' \cdot i_0/I_0$$

debiendo i_0 calcularse de la ec. 5.12 para $x=L$:

$$i_0 = \lambda I_0 \cdot \text{Cosh} \lambda L / \text{Senh} \lambda L = \lambda I_0 \cdot \text{Coth} \lambda L$$

de donde:

$$R = \sqrt{r \cdot R'} \quad \text{Coth} \lambda L \quad \text{ec. 5.13}$$

Debe recordarse que λ' debe calcularse a partir de la -

Ec. 2.14, así:

$$R' = R_L = \frac{\rho}{\pi} \cdot \ln \frac{2L}{d} \quad \text{ec. 5.14}$$

no debiendo confundirse esta R con el de la ec. 5.13.

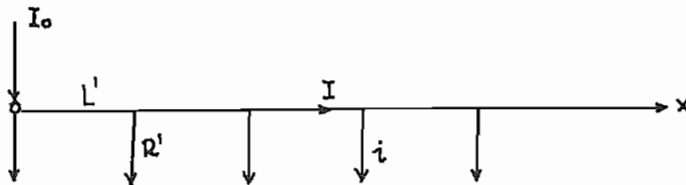
Si el conductor de contrapeso es muy largo; $\text{Coth } L \cong 1$,
de donde:

$$R = \sqrt{r \cdot R'} \quad \text{Ec. 5.15}$$

2.- Impedancia de difusión de choque (Z_s):

Al ocurrir una des -
carga atmosférica cuya corriente es conducida a tierra por
un electrodo en forma de hilo largo (conductor de contrapeso)
juega un papel importante la autoinducción del electrodo. Ya
que los conductores de contrapeso tienen una sección más o -
menos considerable puede despreciarse su resistencia interna
ya que es muy pequeña en comparación con su autoinducción.

Un electrodo de esta naturaleza, como el indicado a continuación, tiene los siguientes parámetros:



I_0 = corriente entrante al conductor (amps.).

i = corriente de difusión al suelo (amp/metro).

I = corriente de conducción en el conductor (amps).

L' = autoinductancia del conductor por unidad de longitud (H/metro).

R' = resistencia de puesta a tierra del conductor, calculada por el método convencional (ohmios-metro), - según Ec. 5.14.

l = longitud total del electrodo (metros).

Haciendo iguales consideraciones que para el caso de la resistencia de difusión, puede llegarse a las siguientes ecuaciones:

$$i + dI/dx = 0$$

$$R^i \cdot di/dx + L^i \cdot dI/dt = 0$$

cuya combinación conduce a la siguiente ecuación diferencial;

$$d^2I/dx^2 - (L^i/R^i) \cdot dI/dt = 0$$

que tiene como soluciones:

$$I = \frac{B}{\sqrt{t}} \cdot e^{-\frac{L^i}{R^i} \cdot \frac{x^2}{t}}$$

$$i = -dI/dx = \frac{2L^i}{R^i} \cdot \frac{x}{t} \cdot I$$

siendo B una constante de integración a fijarse según las condiciones iniciales.

La corriente I, puede representarse en función del tiempo t y de la distancia x, obteniéndose las curvas de la Fig. 5.3.

Como se puede apreciar en la Fig. 5.3.b, la corriente a dopta una forma que se aproxima suficientemente a la forma de una onda de choque ocasionada por un rayo.

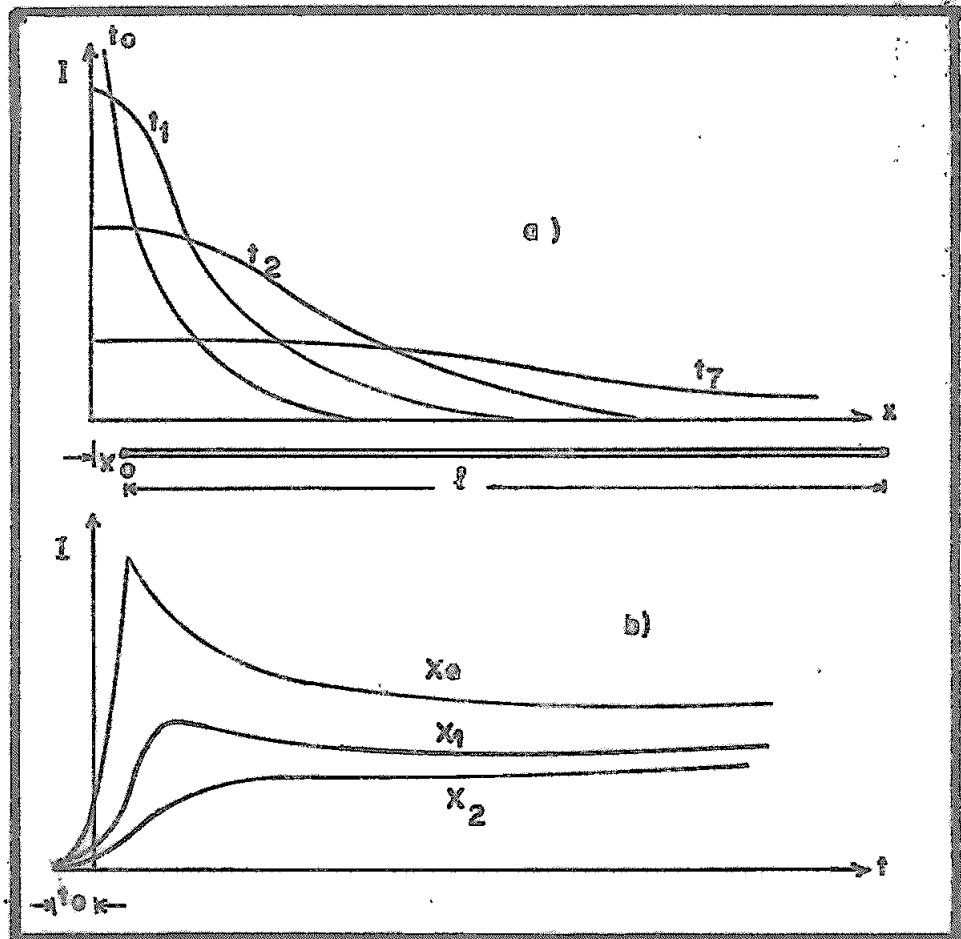
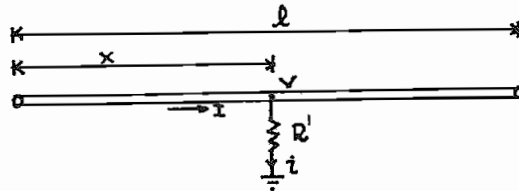


Fig. 5.3.- a) Varación de la corriente en función de la distancia x en un conductor de contrapeso.
 b) Idem en función del tiempo de recorrido de la onda (t).

Los valores iniciales de espacio y tiempo, (x_0, t_0) que determinan el sitio y el instante del inicio de la circulación de la corriente de la descarga atmosférica a través del conductor de contrapeso, no coinciden necesariamente con el

origen de la corriente de la descarga atmosférica y son justamente esos valores de x_0 y t_0 , los que fijan las condiciones iniciales para determinar la constante B.

El voltaje V en cualquier punto del conductor, viene dado por la caída de tensión ocasionada por la corriente de difusión a tierra (i) a través de la resistencia de difusión (R'), como se puede observar a continuación:



$$V = R' \cdot i = 2 \cdot L' \cdot \frac{x}{t} \cdot I$$

La impedancia de difusión de choque en cualquier punto x , y para cualquier tiempo t viene dada por la relación entre el voltaje y la corriente:

$$Z_s = V/I = 2L' \cdot x/t \quad \text{Ec. 5.16}$$

Para encontrar la impedancia al comienzo de la línea, hay que hacer las siguientes consideraciones: Para un tiempo t_0 (Fig. 5.3.b) al cual empieza a crecer la pendiente de la onda de corriente, se puede hallar un valor correspondiente de x_0 ; para esto es necesario hallar la ubicación del punto en las curvas de la Fig. 5.3.a, para el cual la pendiente es máxima, lo cual se consigue si la segunda derivada de I con respecto a x es cero, así:

$$d^2I/dx^2 = \frac{2.B.L'}{R'.t.\sqrt{t}} \left(1 - \frac{2L}{R'.t}x^2\right) e^{-L'/R'.t} x^2/R'.t$$

para lo cual, el término entre paréntesis debe ser cero:

$$1 - 2.L'x^2/R'.t = 0$$

$$x_0^2/t = R'/2.L'$$

éc. 5.17

esta ecuación define el punto en que la pendiente es máxima sin embargo el punto en que empieza justamente a empinarse la corriente, para un tiempo t_0 determinado tendrá un valor x_0 aproximadamente igual a la mitad del expresado por la ecuación 5.17, osea:

$$x_0^2/t_0 = R'/4.L'$$

$$x_0 = 1/2 \cdot \sqrt{R'.t_0/L'}$$

si este valor se sustituye en la éc. 5.16, se obtiene el valor de la impedancia de choque para el comienzo del conductor y para un tiempo t cualquiera:

$$Z_{so} = 2.L'x_0/t = \frac{t_0}{t} \sqrt{R'.L'/t_0} \quad \text{éc. 5.18}$$

y para un tiempo $t = t_0$:

$$Z_{so} = \sqrt{R' \cdot L' / t_0} \quad \text{Ec. 5.19}$$

debiendo R' calcularse según la Ec. 5.14 y L' , de la siguiente manera:

$$L' = 2 \cdot \ln\left(\frac{2l}{d}\right) \cdot 10^{-7} \quad \text{H/metro} \quad \text{Ec. 5.20}$$

reemplazando los valores de R' y L' , se tiene:

$$Z_{so} = \frac{t_0}{t} \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot t_0}} \cdot \ln \frac{2l}{d} \quad \Omega \quad \text{Ec. 5.21}$$

que es la impedancia de difusión de choque para cualquier tiempo t , al comienzo del electrodo.

Este valor es para un hilo de contrapeso que corre en una sola dirección, pero si se tienen hilos de contrapeso de 2 ó 4 radios, las impedancias de choque son respectivamente la mitad y la cuarta parte de la resistencia de un conductor en una sola dirección, cuya longitud sea la suma de las longitudes de los brazos de los electrodos radiales.

En resumen:

Para un conductor de contrapeso en una sola dirección, de longitud L y diámetro d :

$$Z_s = \frac{t_0}{t} \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot t_0}} \ln(2L/d)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln(2L/d)$$

Para un electrodo de 2 brazos, siendo la longitud de cada brazo $L/2$, y de diámetro d :

$$Z_s = \frac{t_0}{2 \cdot t} \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot t_0}} \ln(2L/d)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln(2L/d)$$

Para un electrodo de contrapeso de 4 brazos, siendo la longitud de cada brazo $L/4$, y de diámetro d :

$$Z_s = \frac{t_0}{4 \cdot t} \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot t_0}} \ln(2L/d)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln \left(\frac{L}{d} + 1,7 \right)$$

Siendo todos estos valores de R , los de la resistencia de difusión calculados por las fórmulas del optlo. III.

Según las ecuaciones de la impedancia inicial de choque se observa que éstas decrecen con el tiempo indefinidamente hasta cero, esto es debido a que en la deducción de las fórm-

mulas no se consideró la resistencia interna del electrodo, - sin embargo en la realidad el valor de Z_s decrece solamente hasta alcanzar el valor de la resistencia de difusión R . El tiempo que tarda el electrodo en adquirir su resistencia final depende de la longitud del electrodo así como de la resistividad del suelo.

Con el fin de observar el comportamiento de los tres hilos de contrapeso antes enumerados, se hará una consideración comparativa en forma de ejemplo:

Sea un conductor de contrapeso unidireccional de 300 metros, otro de 2 brazos cada uno de ellos de 150 metros y otro de 4 brazos cada uno de ellos de 75 metros. El diámetro en todos los casos sea de 10^{-2} m. y que estén a flor de suelo, siendo la resistividad de éste 1.000 ohmios-metro y asumiendo que $t_0 = 0.2 \times 10^{-6}$ seg.

Las impedancias de difusión de choque para cada uno de los tipos, para el instante t_0 , serán:

$$Z_{s1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7}}} \ln \frac{2 \times 300}{0.01} = 196 \text{ ohmios}$$

$$Z_{s2} = Z_{s1} / 2 = 98 \text{ ohmios}$$

$$Z_{s4} = Z_{s1} / 4 = 49 \text{ ohmios.}$$

Las resistencias de difusión finales serán:

$$R_1 = \frac{10^3}{\pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \times 300}{0.01} = 11,6 \text{ ohmios}$$

$$R_2 = \frac{10^3}{\pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \times 300}{0.01} = 11,6 \text{ ohmios}$$

$$R_4 = \frac{10^3}{\pi \cdot 300} (\ln \frac{300}{0.01} + 1,7) = 11,6 \text{ ohmios}$$

Los tiempos en que se alcanzan las resistencias finales para cada uno de los tipos de conductores de contrapeso, son; (despejando de la Ec. 5.21 el valor de t , y para $Z_g = R$) los siguientes:

$$t_1 = \frac{2 \times 10^{-7}}{11,6} \cdot \sqrt{\frac{2 \times 10^3 \times 10^{-7}}{\pi \cdot 2 \times 10^{-7}}} \ln \frac{2 \times 300}{0.01} = 3,4 \text{ microseg.}$$

$$t_2 = t_1/2 = 1,7 \text{ microseg.}$$

$$t_4 = t_1/4 = 0,85 \text{ microseg.}$$

De esto se deduce que para una longitud determinada de conductor de contrapeso, es preferible dividirlo en varios brazos radiales, antes que poner un conductor unidireccional, ya que si bien la resistencia final de difusión es igual para los tres casos, la impedancia de choque es menor para los

to por la escala más rápida del respectivo relé de protección, lógicamente tanto más rápido sea dicho tiempo de desconexión cuanto más altos serán los valores permisibles de tensión de contacto y de paso. Por otra parte es necesario hacer una diferenciación entre las diferentes partes del terreno que rodea a una instalación, así se requerirá una mayor seguridad (menores tensiones de paso y contacto) en terrenos exteriores a las instalaciones sujetas a mucho tráfico por parte de personal neófito, que en los terrenos interiores de las instalaciones que son transitados con las precauciones del caso por personal que conoce la peligrosidad de un contacto indebido y que eventualmente puede usar inclusive zapatos aislados que disminuyen aún más el peligro.

Tomando en cuenta estas consideraciones, según las normas VDS, los valores permisibles de contacto y de paso vienen dados en las Figs. 5.4 y 5.5.

V.2.2.- Clasificación de las Torres en el diseño:

Como se ha explicado en el acápite anterior los valores permisibles de tensión de contacto y de paso, dependen directamente de la frecuencia de circulación de peatones en las proximidades de las instalaciones, de ahí la necesidad de clasificar las torres según este criterio:

V.2.2.a.- Torres o Postes Ubicados en lugares Poblados o en terrenos agrícolas sujetas a tráfico intenso!

En

estas torres es necesario mantener los valores especificados en las curvas "1" de las Figs. 5.4 y 5.5 para tensiones de paso y de contacto. Ahora bien, debido a las altas corrientes de cortocircuito propias de las redes con neutro directamente conectado a tierra, se requiere de una resistencia de conexión a tierra sumamente baja, por lo que es necesario en ocasiones hacer una inversión elevada en electrodos de puesta a tierra a fin de conseguir valores bajos en las tensiones de contacto y de paso. Se recomienda en estos casos rodear la torre con grava o cascajo de alta resistividad o/y añadir un electrodo anular para control del potencial situado a una profundidad de 0.2 a 0.5 metros bajo el suelo y a un metro aproximadamente del bloque de fundamento del poste o torre. Sin embargo cuando no es posible aplicar ninguna de estas medidas y por lo tanto no se pueden mantener dentro de los límites permisibles las tensiones de contacto y de paso se puede optar por medidas adicionales con el fin de precaver al máximo cualquier peligro que pudiera ocasionar una falla a tierra, tales medidas son: vigilancia permanente de los aisladores, dimensionado de la resistencia de transición de choque en base a las más altas corrientes de rayo y selección de aisladores adecuados teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas a fin de alcanzar una mayor confiabilidad.

Los máximos valores de tensión de contacto y de paso con ciertos arreglos de electrodos, pueden llegar a ser hasta un 6% del potencial del electrodo de puesta a tierra, sea

por ejemplo este el caso y se trate de averiguar cuál debe ser la resistencia de difusión de una torres que tiene hilo de guarda de acero de 70 mm^2 de sección con un vano medio - de 250 metros, siendo la corriente de cortocircuito a tierra en el sitio de la torre de 10 KA. y el tiempo total de desconexión de la falla de 0.2 segundos.

Según las curvas "1" de las Figs. 5.4 y 5.5. se tiene - que para un tiempo total de desconexión de 0.2 seg. los valores permisibles de tensión de contacto y de paso son de 130 voltios, luego el potencial del electrodo de conexión a tierra debe tener un valor máximo de: $130/0.06 = 2.160 \text{ V}$. El cociente Z_r (Ec.5.6) será :

$$Z_r = 2.160 \text{ V.}/10,000 \text{ A.} = 0.216 \text{ V/A.}$$

con lo que se tiene:

$$Z_r = 0.216 \text{ V/A.}$$

$$r = 1.03 \text{ Ohmios (para 250 metros de vano)}$$

$$F_r = 0.98 \text{ (para acero de } 70\text{mm}^2 \text{)}$$

y se trata de averiguar R , según la Ec.5.6.

$$R = 4 \cdot Z_r^2 / r \cdot F_r^2 = 4 \cdot (0.216)^2 / 1.03 \cdot (0.98)^2 = 0.19 \text{ ohm.}$$

que es la resistencia de difusión que debe tener la torre - en cuestión con el hilo de guarda levantado, que como se ve es un valor muy bajo y difícil de conseguir. Eso se puede remediar en parte utilizando un hilo de guarda mejor conduc

tor por ejemplo aluminio-acero 44/32, en cuyo caso se tendría:

$$Z_r = 0.216 \text{ V/A.}$$

$$r = 0.28 \text{ ohmios (para un vano de 250 Mts.)}$$

$$F_r = 0.77$$

$$R = 4 \cdot (0.216)^2 / 0.28 (0.77)^2 = 1.1 \text{ ohmios}$$

que como se ve es un valor más elevado que el anterior aun que todavía difícil de lograrse con dimensiones razonable de un electrodo de puesta a tierra.

V.2.2.b.- Postes o Torres Cuyos Fundamentos están a más de 15 m. de vías de mucho tráfico:

Se ha determinado por múltiples experiencias que a una distancia de 15 metros o más desde las torres o postes, ya no se presenta prácticamente ninguna tensión de paso peligrosa, sin embargo deben tomarse las medidas necesarias a fin de que esto no suceda, para lo cual deben mantenerse los valores indicados en la curva "1" de la Fig. 5.4, esto se consigue con mucha facilidad por medio de un anillo de control de potencial o circun dando al terreno contiguo mediante grava o cascajo.

V.2.2.c.- Postes o Torres Cuyas Características están fuera de las especificaciones anteriores:

En los postes o torres instalados en zonas muy pocas transitadas las posi-

bilidades de un contacto personal son ínfimas y por lo tanto las seguridades requeridas son también menores. Se puede utilizar electrodos para control de potencial si se ve su necesidad aunque en la generalidad de los casos no es necesario mantener valores mínimos de tensión de contacto y de paso.

Como se puede apreciar para el caso de redes con el neutro directamente conectado a tierra se requiere un diseño más exacto de las instalaciones de conexión a tierra.

V.3.- DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE CONEXION A TIERRA PARA PROTECCION:

Una vez realizadas las mediciones de las resistencias específicas del suelo y conocidos que sean los valores de resistengia de difusión requeridos para las diferentes torres de una línea, será necesario determinar los tipos de electrodos necesarios para conseguir la resistencia de difusión deseada, si ésta no se consigue solamente con la base de la torre.

Como criterio general, serán de utilizarse electrodos profundos (tubos, varillas, etc.) en aquellos terrenos en que las capas inferiores presentan una mejor conductibilidad, en cambio será más conveniente el uso de electrodos superficiales (bandas, anillos, etc.) en aquellos terrenos con sus capas superiores mejores conductoras. Para el caso de que la resistencia específica sea uniforme habrá que pesar desde el punto de vista económico si resulta más conveniente usar uno

de los dos tipos de electrodos, según los cálculos detalla - dos en el capítulo correspondiente.

V.3.1.- Consideración del tipo de torres o postes:

Según el ti po de torres o postes utilizados, es así mismo necesario tomar cierta medidas.

V.3.1.a.- Postes de Madera:

Para postes de madera no se requiere en general un electrodo de conexión a tierra para protección. Sin embargo si estos postes llevan cintas metálicas , usadas como protección contra fracturas, éstas deben ser conectadas a tierra.

V.3.1.b.- Postes metálicos o de hormigón armado:

Este tipo de postes necesitan ser conectados a tierra debiendo su resistencia de difusión cumplir los requerimientos dictados por los valores permisibles de tensión de contacto y de paso; por lo general este valor se consigue solamente con la base delposte.

Se podrá prescindir de estas medidas o sea se puede aceptar una resistencia de difusión mayor que la permitida siempre que se apliquen medidas tendientes a evitar que se produzcan contactos a tierra a través del poste, mediante el uso de aisladores que por su construcción no es de esperar una perforación (p. ej. aisladores de núcleo macizo) , vigi-

zona contigua al poste mediante grava mala conductora.

Si la torre o poste sirve de soporte a un transformador se debe siempre usar un electrodo de control de potencial anular aproximadamente a 0.5 m. bajo el suelo y 1m. alrededor del poste, debiendo conectarse conjuntamente con el electrodo de protección propio del poste, si lo tiene. Así mismo si - con esto no se consigue un valor permisible de las resisten - cias de difusión, será necesario aumentar anillos concéntri - cos y/o rodear al poste con una capa de grava.

En cuanto a las envolturas de cables y las carcasas de las cajas terminales, éstas deben estar siempre conectadas a la instalación de tierra de la torre.

b.- Postes de Madera:

Los interruptores instala - dos sobre postes de madera ofrecen menos dificultad que los instalados sobre postes metálicos o de hormigón, ya que la - propiedad aislante de la madera impide el paso de corrientes - altas a tierra y por lo tanto la tensión de paso aun en las proximidades del poste no es peligrosa. Por esta razón no - se debe reducir el rendimiento del poste en este aspecto, al conectar a tierra los interruptores a través de dicho poste, sino que es preferible hacer dicha conexión en el poste sub - siguiente; en ningún caso es aconsejable conectar la estruc - tura del interruptor a un hilo de guarda, es sin embargo nece - sario que el varillaje de accionamiento del interruptor sea - provisto de un aislador dimensionado para la tensión de serie

de aquel y que la parte inferior del varillaje situada bajo el aislador sea conectada a tierra a fin de proveer de un camino de retorno o de fuga a las corrientes de contorno que podrían ocurrir a través del aislador.

En cuanto a los postes de madera para instalación de transformadores, es necesario adoptar las mismas medidas indicadas anteriormente, en cuanto a que su puesta a tierra debe realizarse en una torse o poste próximo, ya que al efectuarse en el mismo poste, en caso de una falla la corriente sería conducida a tierra a través del sistema de conexión a tierra de éste, que generalmente está más frecuentado por el personal de servicio.

Por todas las razones arriba indicadas, siempre que sea posible es preferible utilizar postes de madera antes que metálicos o de hormigón, en aquellos sitios en que haya que instalar interruptores, seccionadores o transformadores.

V.3.2.- Materiales utilizados para los electrodos:

V.3.2.a.- Acero galvanizado al fuego:

El acero galvanizado presenta una propiedad anticorrosiva, debido a su capa protectora de zinc; naturalmente que para que tal protección sea efectiva, es necesario que dicha capa sea suficientemente gruesa y uniforme. El espesor de dicha capa es del orden de 70 micras, lo que equivale a una proporción de 500 gr/ m² para utilización en terrenos no corrosivos, pero si las ca-

racterísticas del suelo son más bien corrosivas será preciso que tal espesor sea de por lo menos 100 micras (700 gr./m²).

El tiempo de vida útil de un electrodo de acero galvanizado es muy variado según las características del suelo, así se puede esperar una vida de 25 años en terrenos no corrosivos y por el contrario apenas una vida de 2 años en terrenos muy corrosivos.

El uso de hilos de acero sin galvanizar no es muy aconsejado debido a la gran corrosividad que éste presenta al no tener ninguna protección, esto aún enterrenos poco corrosivos.

Con estas consideraciones de corrosividad, se requerirán ciertas secciones mínimas para los diferentes tipos de electrodos, así:

Tipo de Electrodo	Sección mínima para acero galvanizado al fuego:	
Electrodo de cinta	Cinta de acero de:	100 mm ² .
	Espesor mínimo:	3 mm.
Electrodo de barra	Tubo de acero fundido de:	1"
	Acero ángulo "L":	65.65.7
	Acero en "U":	6.1/2

V.3.2.b.- Cobre:

Los electrodos de cobre presentan una vida-útil más prolongada que los de acero y además soportan una mayor cargabilidad de corriente. Uno de los inconvenientes del cobre, aunque no mayor, es que debido a que está ubicado en un extremo de la serie electrolítica de fuerzas electromotrices, es capaz de combinarse con mucha facilidad con otros metales que se encuentren en su proximidad (partes constructivas de acero, envoltura de plomo de cables, tuberías de agua, etc.) lo que puede llegar a ocasionar una corrosión en el electrodo. Es por esto necesario que al tener una instalación de conexión a tierra de cobre, las instalaciones próximas a ella deben ser también en lo posible de cobre. El unir un electrodo de tierra de cobre a una estructura de acero si bien puede ser un tanto perjudicial por lo arriba anotado, no lo es tanto como para evitar esta práctica tan común y sencilla, que por experiencia se sabe da muy buenos resultados.

Las secciones mínimas permisibles para electrodos de co
bre son:

Tipo de Electrodo	Sección mínima para electrodo de Cu	
Electrodo de cinta	Cinta de cobre de:	50 mm ²
	Espesor mínimo:	2 mm.
Electrodo de barra	Tubo de cobre:	30x3
	Cinta de cobre:	50 mm ² /2 mm. espesor

V.3.2.c.- Acero vanizado con Cobre (Copperweld):

En cuanto a la corrosividad este material se comporta similarmente al cobre, por lo tanto en este aspecto se tomarán las mismas precauciones anotadas anteriormente. El Copperweld ofrece sin embargo adicionalmente una mejor resistencia mecánica, por lo que este material se presta mejor para electrodos profundos que tienen que ser enterrados a base de golpes más o menos fuertes.

Las secciones mínimas permisibles para electrodos de acero vanizado con cobre son:

Tipo de Electrodo	Sección mínima permisible para electrodos de Copperweld.
-------------------	--

Electrodo de Cinta	Cinta de Copperweld de:	50 mm ² .
--------------------	-------------------------	----------------------

Electrodo de Barra	Acero de:	Ø 15 mm.
	Capa de cobre de espesor:	2.5 mm.

Si los electrodos de conexión a tierra son usados solamente para control del potencial, las secciones mínimas permisibles son menores que las indicadas, así:

Material	Sección mínima para electrodos de control del potencial:
----------	--

Acero galvanizado	16 mm ² .
-------------------	----------------------

Acero vanizado con Cu	16 mm ² .
Cobre	10 mm ² .

V.3.3.- Consideración del Secamiento del suelo debido a cargas prolongadas:

Al ocurrir una falla que tarde en ser despejada y al circular ésta por un electrodo de conexión a tierra, puede ocurrir que debido al secamiento del suelo que lo rodea debido al calentamiento, de como lugar un aumento desmesurado de la resistencia específica del terreno, lo que a su vez hace crecer el valor de la resistencia de difusión del electrodo y su potencial.

Esto se presenta sobre todo en redes con neutro aislado o puesto a tierra con bobinas de inductancia, por lo cual no es aconsejable dejar que estas redes trabajen mucho tiempo en estas condiciones ya que inclusive hay la posibilidad de que ocurra otro contacto simultáneo a tierra, en cualquier parte de la línea lo que ocasiona una corriente aún mayor.

Los tiempos de carga permisibles de los electrodos, se pueden deducir de las siguientes consideraciones:

Sea por un ejemplo un electrodo semiesférico. La resistencia de una capa de tierra de espesor dx concéntrica a la esfera es:

$$dR = \rho \cdot dx / (\pi \cdot D^2 / 2)$$

siendo D el diámetro de la semiesfera. Al circular una corriente I por el electrodo, la cantidad de calor producida en la capa de tierra de espesor dx, en un tiempo t, es:

$$dQ = I^2 \cdot t \cdot dR = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot dx}{\pi \cdot D^2 / 2} \cdot t$$

esta cantidad de calor es almacenada en dicha capa, cantidad que a su vez puede ser calculada así:

$$dQ = c \cdot \gamma \cdot \Delta T \cdot dV$$

en donde:

c = calor específico del suelo en W/Kg. °C

γ = peso específico del suelo en Kg/m³.

dV = elemento de volumen en m³ = $\pi \cdot D^2 \cdot dx / 2$

ΔT = incremento de temperatura en la capa de suelo en °C

Puesto que la energía generada y la almacenada deben ser iguales, se puede escribir:

$$I^2 \cdot \frac{\rho \cdot dx}{\pi \cdot D^2 / 2} \cdot t = c \cdot \gamma \cdot \Delta T \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot dx$$

$$(2I/\pi D^2)^2 = c \cdot \gamma \cdot \Delta T / \rho \cdot t$$

$$J = 2I/\pi D^2 = \sqrt{c \cdot \gamma \cdot \Delta T / \rho \cdot t} = \text{densidad de corriente en un electrodo esférico de diámetro } D \text{ y que conduce una co-}$$

corriente $2I$.

Para un electrodo tubular, supuesta una densidad de corriente uniforme en su superficie, se tiene:

$$J = I/2.\pi.r.L = \sqrt{c.\gamma.\Delta T/\rho.t}$$

siendo:

r =radio de la sección del electrodo.

L =longitud del electrodo.

I =corriente que conduce el electrodo.

Y en general para cualquier electrodo, independientemente de su forma; la densidad de corriente permisible para un tiempo t es:

$$J = \sqrt{c.\gamma.\Delta T/\rho.t} \quad \text{Ec. 5.22}$$

para el suelo, el producto $c.\gamma$, es: $1.67 \times 10^6 \text{ W/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

V.3.4.- Normas Prácticas para la Ejecución de los Electro - dos:

Determinados que sean los valores permisibles de las resistencias de difusión de los electrodos, es del caso decidir cuál es la forma más adecuada de lograr tal resistencia. Se ha anotado reiteradamente que las características del suelo determinan fundamentalmente el uso de los diferen-

tes tipos de electrodos, así los electrodos superficiales se rán usados en terrenos con capas superiores de buenas propiedades conductoras, mientras que los electrodos profundos se rán preferidos en terrenos con capas inferiores de buena conductividad.

Los electrodos en forma de placas son poco adecuados para cualquier instalación de conexión a tierra, pues requieren una inversión elevada de material y puesto que con otros tipos de electrodos que requieren menor utilización de material, se puede conseguir una resistencia de difusión del mismo orden, es preferible usar tales tipos, entre ellos: electrodos anulares, radiales, de barra, de cinta, etc.

Sea cual fuere el tipo de electrodo utilizado, éste debe tener una buena unión conductora con el suelo; en terrenos rocosos y secos, es aconsejable rodear al electrodo con una capa de barro, ya que las rocas y la grava en contacto con los electrodos aumentan considerablemente su resistencia de difusión.

En cuanto a los electrodos de cinta, éstos se introducirán a una profundidad de 0.5 a 1 metro de la superficie delsuelo, debiendo determinarse su longitud según cual sea la resistencia requerida. En electrodos radiales, el ángulo mínimo entre radios debe ser de 60° , ya que una aproximación mayor no trae consigo una disminución notable de la resistencia de difusión.

En lo referente a la facilidad de instalación de los diversos tipos de electrodos, debe indicarse que para los electrodos superficiales no se requiere ningún tipo de herramienta especial, mientras que para los electrodos en forma de barra son necesarios martillos manuales, a presión de aire, accionados por motor, etc. lo que hace que la instalación de estos electrodos sea más laboriosa.

Los electrodos de barra pueden ser barras, tubos o perfiles, siendo los más cómodos para el clavado los perfiles, pero la resistencia de difusión es algo mayor que para un tubo de igual diámetro exterior, siendo ésta relación aproximadamente: R (tubo) = $0.93 R$ (perfil).

A veces se necesitan electrodos de barra demasiado largos (del orden de 15 m. o más) a fin de aprovechar al máximo la buena conductividad de las capas inferiores del suelo, para lo cual es necesario unir sucesivamente varios pedazos de electrodo, que se fabrican en forma de barras de tamaños que van de 1.5 a 3 metros, la unión entre ellos se realiza de diferentes maneras según el fabricante, siendo lo importante en todo caso que ésta sea lo más rígida y mejor conductora posible. Si se necesitan varios electrodos de barra a fin de conseguir una resistencia de difusión determinada, es aconsejable disponer los electrodos de tal forma que la distancia entre ellos sea por lo menos igual al doble de la longitud de uno de los electrodos.

V.3.5.- Líneas de Tierra:

Aquellos conductores de una instalación de conexión a tierra que unen las partes de la instalación que ha de ponerse a tierra con el respectivo electrodo, se denominan líneas de tierra. Para que éstos sean considerados como tales, deben ser aislados eléctricamente en el suelo, caso contrario forman parte del electrodo de conexión a tierra.

Las líneas de tierra deben ser perfectamente visibles en su tramo exterior del suelo y estar protegidas si es de temer averías ocasionadas por agentes mecánicos o químicos.

Las secciones mínimas permisibles para líneas de tierra son:

Acero galvanizado	50 mm ² .
Acero vanizado con cobre	50 "
Cobre	16 "
Aluminio	35 "

Las uniones de las líneas de tierra, ofrecen cierta sensibilidad al ocasionarse una circulación excesiva de corriente, que puede dar lugar a un sobrecalentamiento de la unión acompañada de oxidación que a su vez ocasiona su debilitamiento progresivo. Estas fallas ocasionadas en las uniones, traen consigo una disminución de la conductibilidad de la línea de tierra que produce una elevación excesiva de la tensión de contacto en la parte de la instalación protegida.

Por todas estas razones, es necesario que las uniones de las líneas de tierra, tanto en la parte del electrodo como en la parte de la instalación a protegerse, deben ser realizadas de tal forma que se garantice una buena consistencia mecánica así como una buena conductibilidad eléctrica; esto se puede conseguir mediante unión soldada o por medio de tornillos o pernos, siendo la más conveniente la que se realiza mediante una buena soldadura.

En caso de postes de hormigón armado, puede introducirse dentro de la construcción del hormigón las líneas para conexión a tierra, debiendo éstas tener lugares de empalme de fácil acceso y no tener ninguna interrupción dentro del hormigón. Pueden utilizarse como líneas de tierra los refuerzos de acero que sirven para la fundición del hormigón, siempre que éstos sean de sección suficiente y estén adecuadamente soldados en toda su trayectoria.

V.3.6.- Resumen de datos necesarios para el diseño de las instalaciones de conexión a tierra para líneas aéreas:

1. Voltaje y frecuencia nominales de operación del sistema.
2. Tipo de conexión del punto neutro del sistema: neutro aislado, con bobinas de inductancia, directamente conectado a tierra o con resistencias limitadoras

3. Para redes con neutro aislado:

- a. Corrientes monofásicas de cortocircuito a tierra.
- b. Corriente de falla bifásica a tierra y tiempo de desconexión para esta falla.

Para redes con bobinas de inductancia:

- a. Corrientes nominales de las bobinas y la corriente residual de falla monofásica a tierra.
- b. Corriente de falla bifásica a tierra y tiempo de desconexión para esta falla.

Para redes con baja resistencia de puesta a tierra:

- a. Corrientes de cortocircuito monofásico a tierra y tiempo de desconexión para esta falla.

4. Resistencias específicas del suelo en la superficie y en las capas inferiores. Propiedades corrosivas del suelo.
5. Características de los hilos de guarda: material, sección, número de hilos y su disposición, etc. Si es del caso también las características de los conductores de contrapeso.
6. Si es una línea existente, la resistencia de difusión de las torres, con el hilo de guarda levantado.
7. Trazado de la línea.

8. Para líneas con neutro a tierra por medio de baja re sistencia, indicar los datos de clasificación de to rres o postes, en el trazado, según V.2.2.
9. Indicación en el trazado de las torres para deriva- ción de cables, torres de maniobra, torres para co- locación de transformadores.
10. Voltaje de choque permisible de los aisladores de la línea.
11. Frecuencia y magnitud de las descargas atmosféricas.

CAPITULO SEXTO

DISEÑO DE LAS INSTALACIONES

DE CONEXION A TIERRA

PARA REDES DE CABLES

VI.1.- FACTORES DE REDUCCION PARA CABLES:

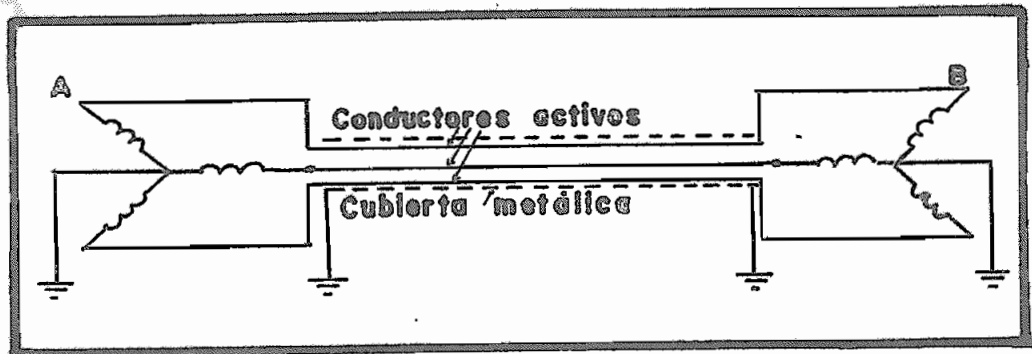


Fig. 6.1.- Esquema representativo de un cable con envoltura metálica que interconecta dos subestaciones.

Supóngase un cable con envoltura metálica que interconecta 2 subestaciones (Fig. 6.1) y dicha envoltura esté conectada a tierra en las dos subestaciones. Si ocurre un contacto a tierra con uno de los conductores activos del cable, se origina una corriente de falla $I_{cc(1B)} = 3I_0$, que ocasiona una inducción de voltaje en la envoltura metálica; llamando Z_{12} a la impedancia de acoplamiento entre la cubierta metálica y los conductores activos del cable, dicha tensión inducida será:

$$I_{cc(1B)} \cdot Z_{12} = 3 \cdot I_0 \cdot Z_{12}$$

En la Fig. 6.2, se indica el circuito equivalente para la condición anteriormente indicada.

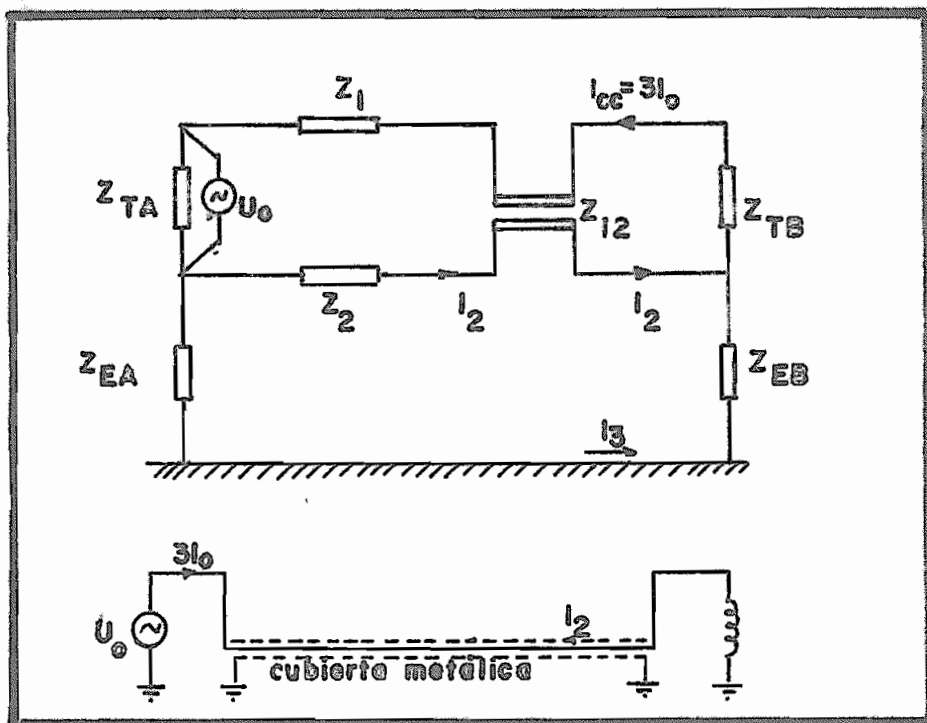


Fig. 6.2.- Circuito equivalente de un cable trifásico con -
 envoltura metálica, que interconecta dos transe -
 formadores, al ocurrir una falla monofásica a -
 tierra en la subestación A.

En la Fig. 6.2, se tiene:

Z_{EA} = Impedancia de conexión a tierra de la subestación A

Z_{EB} = Idem de la subestación B.

Z_{TA} = Impedancia del transformador A.

Z_{TB} = Idem del transformador B.

Z_1 = Impedancia conjunta de los conductores activos del cable.

Z_2 = Impedancia de la envoltura metálica.

Z_{12} = Impedancia de acoplamiento entre Z_1 y Z_2 .

I_2 = Corriente que circula por la envoltura.

I_3 = Corriente de retorno a través de tierra.

I_{cc} = Corriente de cortocircuito monofásico.

En la malla inferior del circuito anterior, se puede obtener:

$$I_3 \cdot (Z_{EA} + Z_{EB}) = -I_{cc} \cdot Z_{12} + I_2 \cdot Z_2$$

pero a su vez: $I_2 = I_{cc} - I_3$, con lo que:

$$I_3 \cdot (Z_{EA} + Z_{EB}) = I_{cc} \cdot (Z_2 - Z_1) - I_3 \cdot Z_2$$

$$I_3 \cdot (Z_{EA} + Z_{EB} + Z_2) = I_{cc} \cdot (Z_2 - Z_1)$$

El factor de reducción de un cable viene dado por la relación existente entre aquella parte de la corriente de cortocircuito que efectivamente circula a tierra (I_3), y la corriente total de cortocircuito (I_{cc}), o sea:

$$F_r = I_3 / I_{cc} = \frac{Z_2 - Z_{12}}{Z_{EA} + Z_{EB} + Z_2} \quad \text{Ec. 6.1}$$

Esto significa que si por ejemplo el factor de reducción de un cable con envoltura metálica es de 25%, el campo eléctrico ocasionado alrededor del cable es igual al de otro sin envoltura metálica que conduce solamente el 25% de la corriente de cortocircuito.

Los potenciales de los electrodos de conexión a tierra de las subestaciones serán:

$$U_A = I_3 \cdot Z_{BA} = F_r \cdot I_{cc} \cdot Z_{BA}$$

$$U_B = I_3 \cdot Z_{BB} = F_r \cdot I_{cc} \cdot Z_{BB}$$

como se puede apreciar, gracias al factor de reducción, se consigue una disminución de los potenciales de los electrodos de conexión a tierra de las subestaciones. Estos factores de reducción se hacen aún más bajos en el caso de que en las proximidades del cable, se encuentren otros conductores puestas a tierra, redes de tuberías de agua, etc., pues éstos ayudan por su parte a conducir a tierra la corriente de cortocircuito.

VI.2.- CABLES CON CUBIERTAS EXTERIORES CONDUCTORAS:

Se entiende bajo este concepto a aquellos cables cuya cubierta exterior sea de suficiente conductibilidad eléctrica, por ejemplo: aluminio, plomo y sobre ellas exista una cubierta de protección no aislante. Bajo este concepto caen también a

quellos cables sobre cuya envoltura metálica existen camisas o fundas de papel impregnado, yute, goma conductora o similares.

La experiencia demuestra que las envolturas metálicas - de los cables presentan una resistencia de difusión relativamente baja, este hecho ofrece la ventaja de que al conectarla cubierta metálica de tales cables a una instalación de conexión a tierra de una subestación por ejemplo, la resistencia de difusión de ésta será disminuída notablemente, en definitiva la envoltura metálica de los cables puede ser utilizada como electrodo adicional de conexión a tierra.

Debe hacerse notar, que la resistencia de difusión de la cubierta metálica varía con el tiempo, siendo menor cuanto mayor sea el tiempo que el cable esté en servicio; esto se debe a que al comienzo no existe aun un buen contacto entre el suelo y la envoltura, el mismo que se mejora con el transcurso del tiempo y además la humedad del suelo hace sentir sus efectos lentamente así mismo con el transcurso del tiempo. De esta forma la resistencia de difusión de la envoltura se va acercando poco a poco a un valor final y definitivo, el mismo que es alcanzado después de unos meses de instalado el cable.

Las corrientes que son conducidas a tierra por la envoltura metálica, tienen que atravesar además de la resistencia de difusión a tierra, también la resistencia óhmica de la en

voltura, por esta razón, para la evaluación de la resistencia de difusión de la envoltura, son de más importancia las partes cercanas al comienzo del cable ya que dicha resistencia disminuye conforme aumenta la longitud, de una manera más o menos asintótica, de tal forma que una vez alcanzado un valor final, dicha resistencia de difusión no puede ser disminuída más aunque se aumente la longitud del cable, siendo además hasta cierto punto independiente de la resistencia específica del suelo. En el caso de tener varios cables que salen de un mismo punto, la resistencia de difusión de la combinación, es muy aproximadamente igual a la suma en paralelo de las resistencias de difusión de las envolturas individuales.

La resistencia de difusión de una envoltura de plomo, tiene un valor promedio de 1.7 a 2 ohmios, el mismo que se alcanza con una longitud aproximada de cable de 1,200 metros sin embargo las partes de la envoltura situadas más allá de los 500 metros no contribuyen ya mayormente a la disminución de tal resistencia, pues para un cable de 500 m. se tiene ya una resistencia de difusión aproximada de 3 ohmios.

La resistencia de difusión de la envoltura metálica de un cable, se puede calcular considerando como si ésta fuera un electrodo en forma de banda tubular horizontal, aplicando la Ec. 5.13.

VI.3.- MEDICION DEL POTENCIAL DE LOS ELECTRODOS Y SUS RESISTENCIAS DE DIFUSION EN REDES DE CABLES:

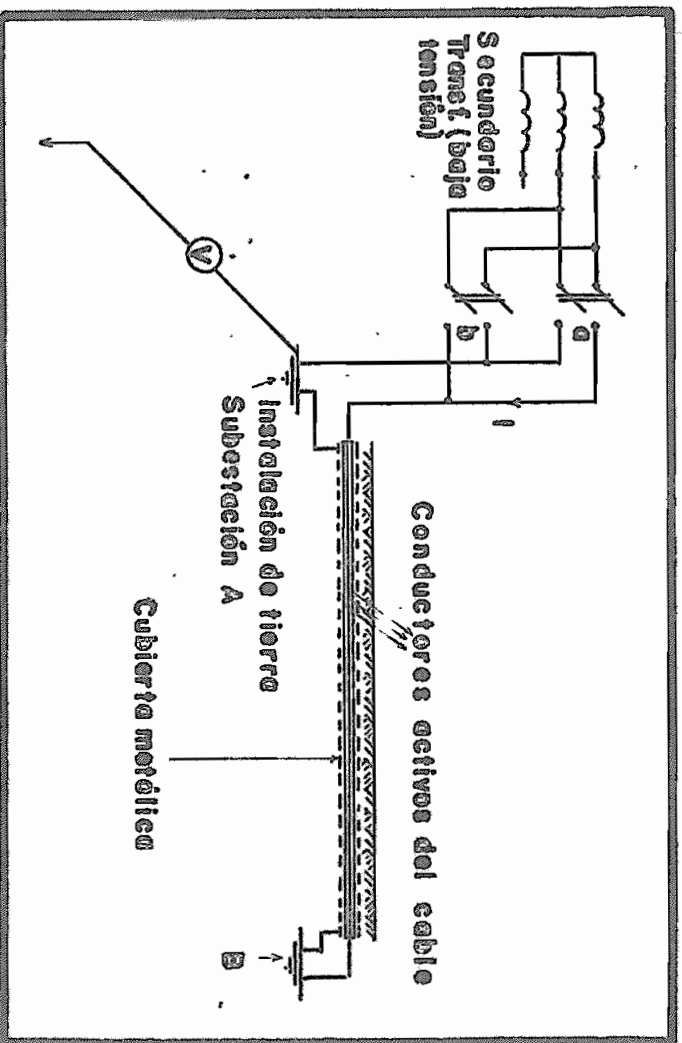


Fig. 6.3.- Circuito para la medición del potencial y la resistencia de difusión de los electrodos en redes de cables;

Para ilustrar el método, sea una instalación compuesta por un cable que une dos subestaciones (A y B), cuyos electrodos de conexión a tierra presentan un determinado potencial y una resistencia de difusión, en caso de una falla a tierra de uno de los conductores activos del cable, los cuales se tratan de determinar.

El procedimiento utilizado para la determinación del potencial del electrodo de una de las subestaciones, es el in-

dicado en la Fig. 6.3 y consiste en hacer circular a través de los conductores activos del cable una corriente de cortocircuito determinada (I), no hace falta sin embargo que tal corriente sea la máxima de cortocircuito a tierra que se espere obtener en el sistema en servicio, sino que basta imprimir una corriente relativamente baja de 100 a 200 amps., pues el factor de reducción de los cables permanece casi inalterado al variar la corriente. Los tres conductores activos se cortocircuitan y a los tres en conjunto, se les imprime la corriente antes citada, la misma que cierra su circuito por el otro extremo del cable, por medio del contraelectrodo que puede ser la instalación de tierra de la subestación B y a través del suelo regresa al electrodo de la estación A y de aquí a la otra fase del transformador de alimentación. En caso de cables con cubiertas exteriores aislantes, también puede ser utilizado este método. Como fuente de alimentación, se puede usar un transformador de distribución (puede ser el de servicios auxiliares de la estación).

Puesto que la instalación de conexión a tierra de la estación a medirse, puede estar sujeta a influencias de corrientes de la frecuencia nominal del sistema, provenientes de instalaciones próximas, es necesario que éstas sean tomadas en cuenta con el fin de determinar la magnitud verdadera del potencial del electrodo de la subestación.

El procedimiento es el siguiente:

1. Sin alimentar aun el cable, o sea con los interrup-

tores "a" y "b" desconectados, es necesario medir el potencial del electrodo con respecto a una tierra de referencia - suficientemente alejada, con un voltímetro de válvulas de alta resistencia ónterna; de esta forma se determina el potencial ocasionado en el electrodo debido a influencias extrañas, (U_0).

2. Luego se imprime al cable la corriente I, conectando el interruptor "a" y se mide el valor de tensión de la misma manera que en el punto 1. Esta tensión así medida (U_1) es el resultado de la suma de las tensiones originadas por influencias extrañas (U_0) y la originada debido a la propia corriente de la instalación (U_E), que es el potencial del electrodo que va a ser determinado.

3. Se invierte la polaridad de la alimentación, desconectando "a" y conectando "b", la tensión medida de esta forma (U_2) es el resultado de la suma de las tensiones originadas por influencias extrañas (U_0) y la originada por la corriente de la propia instalación, pero con signo cambiado ($-U_E$).

De esta manera se han determinado 3 valores de tensión- (U_0, U_1, U_2) cuyas magnitudes se conocen pero no sus ubicaciones, se sabe sin embargo que:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_0 + \bar{U}_E$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_0 - \bar{U}_E$$

Estas condiciones pueden ser expresadas gráficamente como se indica en la Fig. 6.4.

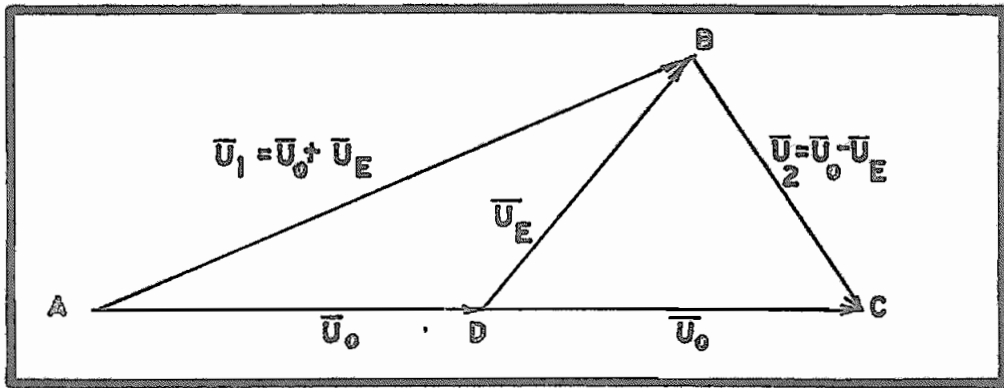


Fig. 6.4.- Diagrama de Vectores para la determinación del potencial del electrodo U_B .

Se trazan los vectores \bar{U}_0 (segmentos AD y DC) según el valor medido en 1. Haciendo centro en A se señala la magnitud del vector U_1 según lo medido en 2 y haciendo centro en C se hace lo mismo para U_2 . La intersección de los dos arcos da el punto B, que unido a D, determina la magnitud de la tensión del electrodo U_B para el valor de corriente escogido; para el propio valor de la corriente de cortocircuito, habrá que hacer la corrección en la proporción debida, así por ejemplo si el valor de corriente impreso al cable fué de 100 amps. y el valor de la corriente de cortocircuito monofásico es de 1.000 amps., el valor real del potencial del electrodo para la corriente de cortocircuito será igual al valor obtenido por el método antes indicado, multiplicado por 10.

Determinado que sea el potencial del electrodo, el valor

de la resistencia de difusión del electrodo (R_B) se puede de terminar fácilmente, en efecto:

$$U_B = F_r \cdot I_{cc} \cdot R_B$$

de donde:

$$R_B = U_B / F_r \cdot I_{cc} \quad \text{Ec. 6.2}$$

El método descrito puede ser también aplicado para la medición de tierras en subestaciones de líneas aéreas, de la misma forma que para cables.

VI.4.- MEDICION DE LAS TENSIONES DE PASO:

Con el mismo método que se acaba de detallar, se puede medir el potencial de varios puntos en las inmediaciones de la instalación de conexión a tierra, determinándose así las curvas de distribución del potencial y por lo tanto las tensiones de paso en las diferentes direcciones.

VI.5.- DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE CONEXION A TIERRA PARA RHDHS DE CABLES:

Las envolturas metálicas conductoras, las capas para protección mecánica y las pantallas electrostáticas deben ser conectadas entre sí y ponerse a tierra en ambos extremos del cable; se puede recurrir a la conexión a tierra en un solo extremo del cable, en el caso de que se

prevea que tanto en servicio normal como en caso de falla no se presenten tensiones de paso peligrosas.

La unión entre la cubierta metálica y la cubierta para-protección mecánica, es necesaria por varias razones; a veces se puede observar que en un cable existen pequeñas perforaciones en su envoltura de plomo, lo cual hace pensar que ha existido una circulación de corriente entre la cubierta para protección mecánica y la envoltura de plomo, lo cual se debe a diversas causas; puede ocurrir que al suscitarse una falla por descarga atmosférica en las proximidades del trayecto del cable, la corriente se difunda hasta el cable mismo, llegando a perforar la envoltura de plomo, tales perforaciones son comunes de encontrar en las proximidades de árboles en los que al caer un rayo conducen su corriente a tierra por medio de las raíces hasta el cable mismo llegando a perforar la envoltura de plomo; la corriente que llega a la cubierta para protección mecánica ocasiona una diferencia de potencial entre ésta y la envoltura de plomo que hace romper la capa aislante existente entre las dos y produce la circulación de corriente con el calentamiento y la perforación consiguientes en la envoltura de plomo. Tales perforaciones pueden también deberse a que con el transcurso del tiempo la humedad del suelo penetre al cable y se produzca un cortocircuito entre un conductor activo y la envoltura de plomo o puede también deberse a corrientes de cortocircuito a tierra ocurridas en una instalación en la que se encuentre uno de los terminales del cable, las cuales toman el camino de la envoltura de plomo que se supone estará conectada a tierra -

en dicha instalación. En todos estos casos, se presenta una diferencia de potencial entre la envoltura de plomo y la cubierta para protección mecánica, cuando las dos no están unidas entre sí, lo que ocasiona lógicamente la perforación de la envoltura.

En cables que terminan en postes o torres, las cajas terminales así como la envoltura metálica y la cubierta de protección mecánica deben también ser conectadas a tierra e incluso la envoltura mecánica puede ser utilizada como electrodo de conexión a tierra de la torre o poste, en caso de que su resistencia de difusión sea suficiente para cubrir los requerimientos de puesta a tierra de aquellos.

VI.5.1.- Cargabilidad de las cubiertas metálicas de los cables:

Por lo general las corrientes que circulan por las envolturas metálicas no son muy altas, pero si se da el caso de que éstas sobrepasen los límites de cargabilidad de ellas, será de tomar providencias a fin de aliviar a la envoltura de una carga excesiva, esto rige sobre todo para redes con el neutro directamente conectado a tierra.

La cargabilidad de las envolturas metálicas de plomo, puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$J = 2.66 \sqrt{\Delta \cdot T/t} \quad \text{amp./mm}^2$$

Si ocurre que para un tiempo de desconexión de la falla

"t" y un aumento admisible de temperatura en la envoltura metálica " ΔT ", la corriente que circula por la misma sobrepasa el valor admisible, entonces se recomienda conectar en paralelo con la envoltura un hilo de cobre a lo largo de una distancia determinada a fin de aliviar la carga de la envoltura.

Ahora bien, el hilo de cobre no es necesario extenderlo en toda la longitud del cable, sino sólo en aquel tramo en que la corriente de circulación en la envoltura sobrepase el valor permisible, lo cual se puede determinar de la manera en que se ilustra a continuación:

Sea por ejemplo un cable NKBA 4x70 cuya impedancia interna es 2.3 ohmios/Km., el área de sección de plomo es de 100 mm² y el diámetro del cable es 0.05 m. El cable esté conectado a una subestación siendo el potencial del electrodo de conexión a tierra de la misma de 1.000 voltios, el tiempo de desconexión de una falla determinada sea 1 seg. y el incremento permisible de temperatura en la envoltura sea de 20°C. La longitud del cable sea 2.500 m. y la resistencia específica del suelo 50 ohmios-metro.

La resistencia de difusión de la envoltura, aplicando la Ec. 5.13 es:

$$R = \sqrt{r_0 R'} \operatorname{Coth} \lambda L$$

siendo:

$$r = 2.3 \times 10^{-3} \text{ ohmios/m.}$$

$$L = 2.500 \text{ m.}$$

$$R' = \frac{\rho}{\pi} \ln (2L/d) = \frac{50}{\pi} \ln (5.000/0.05) = 184 \text{ ohm-m.}$$

$$\lambda = \sqrt{r/R'} = \sqrt{2.3 \times 10^{-3} / 184} = 3.54 \times 10^{-3}$$

$$\text{Coth } \lambda \cdot L = \text{Coth } 8.8 \approx 1$$

$$R = \sqrt{2.3 \times 10^{-3} \times 184} = 0.65 \text{ ohms.}$$

La corriente que entra a la envoltura metálica, se obtiene de dividir el potencial del electrodo de la subestación a la que está conectado el cable para la resistencia de difusión de su envoltura metálica:

$$I_0 = U_E/R = 1.000/0.65 = 1.550 \text{ amp.}$$

La cargabilidad permisible de la envoltura de plomo es:

$$J = 2.66 \sqrt{\Delta T/\tau} = 2.66 \sqrt{20/1} = 12 \text{ amp/mm}^2$$

$$I_{\text{permisible}} = J \cdot \text{Area de la envoltura de plomo} = \\ = 12 \times 100 = 1.200 \text{ amps.}$$

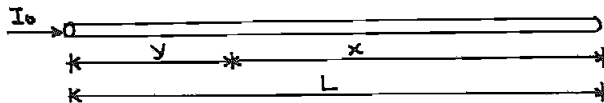
Como se ve hay un exceso de 350 amps. entre la corriente que entra a la envoltura (I_0) y la corriente permisible de circulación por ésta. Es preciso ahora determinar hasta que

distancia "y" desde el comienzo del cable la corriente sobrepasa el valor permisible. Según la Ec. 5.11:

$$I_x = I_0 \cdot \text{Senh } \lambda \cdot x / \text{Senh } \lambda \cdot L$$

$$I_x = 1.200 \text{ amp.}$$

$$I_0 = 1.550 \text{ "}$$



$$x = \frac{1}{\lambda} \cdot \text{Arg Senh} \left(\frac{I_x}{I_0} \text{Senh } \lambda \cdot L \right)$$

$$x = \frac{1}{3.54 \times 10^{-3}} \cdot \text{Arg. Senh} \left(\frac{1.200}{1.550} \cdot \text{Senh } 8,8 \right)$$

$$x = 0,28 \times 10^3 \cdot \text{Arg. Senh } 2,500 = 280 \times 8,5 = 2.400 \text{ m.}$$

$$y = L - x = 2.500 - 2.400 = 100 \text{ m.}$$

O sea que la corriente excesiva subsiste solamente hasta una distancia de 100 m. desde el comienzo del cable y en este tramo será necesario conectar en paralelo con la envoltura un hilo de cobre que conduzca el exceso de corriente.

En general esta medida es necesaria solamente en cables cuyas cubiertas metálicas son muy delgadas. En el ejemplo que se desarrolló anteriormente es necesario un hilo de cobre ya que se supusieron condiciones muy severas, pues el aumento permisible de temperatura se fijó sólo en 20°C, el cual

es un valor muy bajo, así como el tiempo de desconexión de la falla se fijó en 1 seg., valor demasiado alto.

VI.5.2.- Líneas de Tierra para Cables:

Las secciones mínimas de las líneas de tierra son las mismas que para otros tipos de electrodos, osea: 16 mm² para líneas de cobre, 35 mm² para aluminio y 50 mm² para acero galvanizado y copperweld. Es preciso sin embargo que las secciones sean determinadas para la corriente de cortocircuito doble a tierra en redes con neutro aislado o con bobina de inductancia y para la corriente de cortocircuito monofásico a tierra en redes con neutro directamente conectado a tierra.

Igual que en el caso de líneas aéreas se debe proveer a las uniones de las líneas de tierra de una máxima seguridad mecánica así como de una buena conductibilidad eléctrica, por medio de soldadura por ejemplo.

VI.5.3.- Interconexión y Separación de las Instalaciones de Conexión a Tierra:

VI.5.3.a.- Redes con alta resistencia de conexión a tierra - de su punto neutro:

1.- Tratamiento conjunto de las instalaciones de tierra para protección y servicio:

Como se ha explicado al comienzo del presente estudio la conexión a tierra para ser-

vicio es aquella en que se conecta una parte de la instalación perteneciente al circuito de servicio, a tierra, como por ejemplo el neutro de los transformadores.

Las tierras de protección y de servicio pueden ser interconectadas entre sí, o sea que basta una instalación común para las dos, si en caso de falla no se presenta un potencial del electrodo superior a 125 voltios. En redes con bobinas de inductancia hay que tomar en cuenta para el diseño además de la corriente residual de cortocircuito a tierra también la corriente total de las bobinas. Si la instalación contiene redes de diversas tensiones se diseñará la conexión a tierra para la red que presente mayor corriente de cortocircuito a tierra.

Si por el contrario, en caso de falla el electrodo común de conexión a tierra sobrepasa el valor de 125 V. es necesario disponer las instalaciones de conexión a tierra por separado para las tierras de protección y de servicio.

2.- Conexiones a tierra para instalaciones conjuntas de alta y baja tensión:

La principal consideración que se debe hacer para saber si es factible o no interconectar entre sí las instalaciones de conexión a tierra de alta y baja tensión (mayores y menores de 1 KV.), es el peligro que tal conexión puede traer consigo y que se podría eliminar mediante instalaciones separadas.

Como se anotó en su oportunidad las tensiones permisibles de los electrodos de conexión a tierra para instalaciones de alta tensión son de 125 V., y para las de baja tensión de 65 V. Las instalaciones de conexión a tierra en redes con neutro aislado o con bobinas de inductancia, se diseñan para la corriente de cortocircuito a tierra o para la corriente residual, según el caso, dejándose la falla doble a tierra para que sea despejada por el respectivo relé de protección.

En cuanto a las posibilidades de interconexión o separación de las instalaciones de conexión a tierra de alta y baja tensión hay que hacer algunas consideraciones:

- 2.a.- Si la red de alta tensión está constituida por cables con envolturas metálicas de buena conductibilidad (Pb, Al) y sobre ellas hay una cubierta no aislante de protección:

En este caso se puede utilizar una instalación común de conexión a tierra, sin importar que la línea de baja tensión esté constituida por cables o líneas aéreas, pues la resistencia de difusión de la red de cables de alta de ese tipo es lo suficientemente baja para prevenir que en caso de falla, el potencial del electrodo tome valores excesivos y aún en caso de una falla doble a tierra, la corriente no circula íntegramente por la instalación de conexión a tierra, sino que se distribuye a lo largo de la envoltura metálica del cable de alta tensión, lo cual contribuye a bajar el potencial del electrodo.

El potencial de conexión a tierra del electrodo se diseña en este caso para un máximo de 125 V., en caso de falla a tierra.

2.b.- Si la red de alta tensión está constituida por cables y líneas aéreas y los cables tienen envolturas metálicas conductoras:

Se puede también en este caso recurrir a una instalación común de conexión a tierra para alta y baja tensión, siempre que los cables de la red de alta tengan por lo menos 2 derivaciones radiales con una longitud total entre las dos de por lo menos 3 Km., para así conseguir una resistencia de difusión suficientemente baja. No importa que la red de baja tensión sea de cables o líneas aéreas. El electrodo se diseña para un potencial máximo de 125 voltios.

2.c.- Si la red de alta tensión es línea aérea y la de baja es de cables con envoltura metálica conductora:

En este caso así como en aquellos en los que la separación de las instalaciones sea físicamente imposible, por ejemplo en localidades industriales o localidades que estén unidas entre sí por elementos conductores como tuberías de agua, etc., se permite una instalación conjunta de conexión a tierra para alta y baja tensión, debiendo sin embargo diseñarse la misma, de tal forma que el potencial del electrodo de conexión a tierra no sobrepase el valor de 65 V

2.d.- Si las redes de alta y baja tensión son líneas a áreas o cables con envolturas no conductoras:

Es-

to es, si no se cumplen las condiciones hasta ahora citadas, es necesario disponer dos conexiones a tierra separadas para alta y baja tensión. En este caso los electrodos de conexión a tierra estarán separados entre sí por lo menos 20 m. Es - to es también aplicable aun en el caso de que la línea aérea de baja tensión esté conectada a la estación por medio de un tramo pequeño de cable.

Con respecto a esta última posibilidad caben hacerse al gunas anotaciones: si para la unión de la línea aérea de ba ja tensión con la estación se utilizan cables con cubierta a aislante de por lo menos 20 m., la puesta a tierra para servi ci o de baja tensión se puede realizar en el mismo poste de a cometida del cable; las pantallas, armaduras, etc. pueden co nectarse con el hilo de puesta a tierra de baja tensión; pe- ro si se utilizan cables con envoltura metálica conductora , es preciso que dicha envoltura, la armadura si ésta existe y la caja terminal se conecten suficientemente aisladas con - respecto a las partes de la instalación de baja tensión que han de conectarse a tierra; tales partes del cable pueden - conectarse a la puesta a tierra de alta tensión. La puesta- a tierra para servicio se realizará en el poste subsiguiente al de empalme entre el cable y la línea aérea.

VI.5.3.b.- Redes con el neutro conectado a tierra por medio de baja resistencia:

En este tipo de redes hay - que tomar las mismas medidas que para redes con alta resis - tencia de conexión a tierra; sin embargo en aquellas redes cu - yo punto neutro es pasajeramente puesto a tierra y en las - que en caso de falla el potencial del electrodo sobrepasa 65 voltios, es preciso separar la conexión a tierra de servicio de baja tensión de la de alta tensión.

Es de recomendar que aquellas partes de una instalación que son muy frecuentadas por personas, tales como hidrantes, armarios de comando, cabinas telefónicas, etc. deben ser pro - tegidas por medio de un electrodo de control de potencial.

VI.6.- INFLUENCIA DE LOS CABLES DE ALTA TENSION SOBRE LOS - CABLES DE SEÑALIZACION CERCANOS:

Los cables de señali - zación que entran en una instalación, tienen un potencial di - ferente que la instalación de conexión a tierra, en caso de una falla a tierra, por esto es necesario conectar las envol - turas metálicas de tales cables a la instalación de puesta a tierra de la estación, tal unión elimina la diferencia de po - tencial entre el cable de señalización y el terreno que lo - rodea y reduce las probabilidades de formación de arco que - dañaría la envoltura metálica.

Por otra parte los conductores de los cables de señali -

zación pueden adquirir potenciales elevados con respecto a la envoltura metálica, así si las envolturas están unidas a la instalación de conexión a tierra de la estación, dicha envoltura será atravesada por una corriente de cortocircuito en caso de falla a tierra y el campo magnético ocasionado en la envoltura induce una tensión en los conductores que es igual a la caída de potencial inductiva de la envoltura.

Si tales cables de señalización, corren paralelos en cierto tramo o en toda su longitud a líneas aéreas o cables de alta tensión, las corrientes de falla a tierra que pudieran ocasionarse en éstos y que tienen su camino de retorno por tierra, pueden ejercer su influencia sobre los cables de señalización, dependiendo esto de la magnitud de la corriente de cortocircuito, de la longitud del cable influenciado y de la separación entre éste y el cable o línea que ejerce la influencia; ésta influencia se presenta en forma de inducción producida por el campo magnético de los conductores de alta tensión sobre los cables de señalización, ocasionando una sobreelevación de tensión en los conductores de éstos últimos.

Por estas razones es preciso tomar medidas de precaución en cuanto al manejo de los cables de señalización con el fin de evitar que las personas que puedan entrar en contacto casual con ellos o que tengan que trabajar con los mismos, no estén expuestas a tensiones de contacto elevadas y la vez también evitar que se deteriore el cable al ocasionarse una-

diferencia de potencial más allá de la permisible entre los conductores y la envoltura metálica. Esto se puede conseguir, utilizando una plataforma aislante al realizar cualquier trabajo sobre los cables de señalización.

B I B L I O G R A F I A

1. Karl Feist "Erdungs und Schutzmassnahmen in Elektrischen Anlagen"
Seminario - Editorial Siemens, Erlangen.- 1.967
2. Walter Koch "Erdungen in Wechselstromanlagen"
Editorial: Springer-Verlag.
3ra. Edición - 1.961
3. Bossi-Coppi "Impianti di Terra"
Editorial: Ulrico Hoepli, Milano.
1.964
4. VDEW "Technische Richtlinien für Erdungen in Starkstromnetzen"
Editorial: VDEW.
1.962
5. Karl Feist "Erdungsmessungen in öffentlichen und industriellen Stromversorgungsanlagen"
Revista Siemens.
Junio - 1.968
6. R. Rüdemberg "Elektrische Wanderwellen"
Editorial: Springer-Verlag.
1.962

7. Karl Feist "Erfordernisse der Erdung bei Kabel -
mit äusserer isolierender Schutzhülle"
Revista: "Elektrizitätswirtschaft"
N° 11 - 68/69
8. Karl Feist "Wirksame und wirtschaftliche Ausführung
von Erdern" (Folletto)
Editorial: Vogel-Verlag, Würzburg.
1.967
9. Siemens "Der Erdschluss im Netzbetrieb"
Editorial: Siemens-Verlag.
10. Roeper "Kurzschlussströme in Drehstromnetzen"
Editorial: Siemens-Verlag.
1.964
11. Westinghouse "Transmission and Distribution"
Editorial: Westinghouse Co.
1.964
12. W. W. Lewis "Protection of Transmission Systems a
gainst Lightning"
Editorial: John Wiley and Sons, Inc.
1.950
13. AIEE "Guide for Safety in Alternating-Cu -
rrent Substation Grounding"
Revista AIEE - N° 80 - 1.961

14. Sunde

"Earth Conduction Effects in Transmission Systems"

Edit: D. Van Nostrand Co. Inc.

1.949

15. VDE

"Determinaciones para las tomas de tierra en instalaciones de corriente alterna de tensiones nominales mayores de 1 KV."

Normas VDE 0141/2.64 (Traducción al Español).