

621.31
6633

Escuela Superior Politécnica del Litoral

NORMAS PARA PUESTAS A TIERRA

Tesis de GRADO que para obtener
el Título de Ingeniero en Electricidad

PRESENTA:

José Ramón Gómez Martínez

GUAYAQUIL - ECUADOR
- 1975 -

IMPRESION Y VENTAS CON
D-1449

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL

NORMAS PARA PUESTAS A TIERRA

TESIS DE GRADO QUE PARA OBTENER EL
TITULO DE INGENIERO EN ELECTRICIDAD
PRESENTA:

JOSE RAMON GOMEZ MARTINEZ

GUAYAQUIL - ECUADOR

1975

NORMAS PARA PUESTAS A TIERRA

AUTOR



.....

JOSE RAMON GOMEZ MARTINEZ

CERTIFICADO POR



.....

ING. PABLO ORTIZ SAN MARTIN

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesis corresponde exclusivamente al Autor.

El patrimonio intelectual de la presente Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL).

A MI ESPOSA E HIJOS

INDICE

I.-INTRODUCCION	1
II.-ALCANCE	2
III.-CLASIFICACION	2
1.-Para proteccion	2
2.-Para funcionamiento	2
3.-Para trabajo	2
IV.-DISPOSICIONES GENERALES	3
1.-Electrodos	4
2.-Resistencias	21
V.-CONDUCTORES	29
1.-Generalidades	29
2.-Capacidad	30
3.-Identificacion	34
4.-Proteccion mecanica y contracontacto	35
VI.-EN SISTEMAS ELECTRICOS	37
A.-Aplicacion	37
a.-Circuitos de corriente continua	37
b.-Circuitos de corriente alterna	37
B.-Conexiones	40
a.-En sistemas de distribucion de corriente continua	40
b.-En sistemas de corriente alterna	41
VII.-EN EQUIPOS	42
A.- Aplicacion	42
B.-Conexiones	44
VIII.- EN PARARRAYOS	47
A.-En circuitos primarios	47

IX.-EN AREAS PELIGROSAS	49
A.-Generalidades	49
B.-Consideraciones generales	49
C.-Consideraciones especiales a la industria petrolera	49
D.-Aplicación	50
E.-Resistencias	51
F.-Tuberías	51
X.-CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LA SUBESTACION GUAYAQUIL DE 450 MVA 230/138 KV	79
a.-Resistividad del suelo	79
b.-Corrientes de falla	80
c.-Diseño preliminar de la malla de tierra	81
1.-Medida del conductor	81
2.-Preliminares del diseño	82
3.-Resistencia de la malla	86
d.-Cálculo del máximo potencial de la malla	87
e.-Potencial de contacto	88
f.-Potencial de paso	89
g.-Especificaciones técnicas de la subestación	91

I.-INTRODUCCION

El tema de tesis tratado en esta obra, tiene la finalidad de dar una guía sobre los métodos adoptados para obtener la puesta a tierra de un sistema eléctrico; con el propósito de limitar las diferencias de potenciales con respecto a la masa general de tierra, de los conductores que conducen corriente, los cuales forman parte del sistema; y de las partes metálicas asociadas con equipos e instrumentos conectados al mismo.

El primer objeto es esencial para la seguridad del sistema y es conocido como "tierra del sistema" ; y el segundo encierra la seguridad de la vida humana y de la propiedad, este aspecto es conocido como "tierra de equipos".

El contenido de este estudio puede resumirse en los siguientes puntos:

- 1.- Generalidades
- 2.- Tierra del sistema eléctrico
- 3.- Tierra de equipos
- 4.- Cálculos y diseños

II.-ALCANCE

Las siguientes reglas se aplican a la conexión a tierra de todos los circuitos, equipos, canalizaciones de conductores y de pararrayos, cuando la conexión a tierra está destinada a ser una medida de protección permanente y eficaz.

III.- CLASIFICACION

Se clasifican de acuerdo a la función que desempeñan en:

- 1.- Puestas a tierra para protección
- 2.- Para funcionamiento
- 3.- Para trabajo

1.- Para protección.-Son los que tienen la misión de limitar el valor de la tensión con respecto a tierra en aquellas partes del sistema eléctrico que no deben ser mantenidas ni en tensión, ni aisladas y con los cuales se puede poner en contacto el personal. Por ejemplo: La carcasa de una máquina eléctrica, herrajes de sostén de aisladores, transformadores de medida, etc.

2.- Para funcionamiento.- Sirven para poner a tierra por necesidad de funcionamiento determinados puntos del circuito eléctrico (neutro de generadores, transformadores, pararrayos, etc.)

3.- Para trabajo.- Son sistemas de tierra de protección con carácter provisional, efectuados, para poner a tierra

parte de una instalación eléctrica en servicio y en la cual se necesita efectuar un trabajo o reparación.

IV.- DISPOSICIONES GENERALES

Al estudiar los elementos que constituyen un sistema de puesta a tierra, se puede considerar los siguientes:

- a.- electrodos
- b.- resistencias
- c.- conductores de puesta a tierra

Los electrodos son los dispersores de corrientes de falla a tierra. Estos son cuerpos metálicos puestos en contacto directo con la tierra, y pueden ser de forma de varilla, tubos o planchas metálicas.

La resistencia de tierra, depende de la resistividad del suelo en el cual están enterrados. La conductividad de la tierra es esencialmente electrolítica. Y es por lo tanto afectada por el contenido de humedad del suelo, por la composición química y por la concentración de sales disueltas en el agua contenida.

Las figuras 3, pag. 55 y 3a. pag. 56 muestran los efectos de la humedad y salinidad en la resistividad de la tierra.

Los conductores son la parte del circuito de la tierra que unen el electrodo con la parte protegida.

El calibre y longitud del conductor están determinados por efectos térmicos a que el conductor estará sometido durante una falla, están relacionado con el tiempo de

duración de ésta, la cual a su vez depende de la sensibilidad del interruptor; y la máxima temperatura que pudiera causar daño a la conexión de tierra o a los equipos que esten en contacto.

1.- ELECTRODOS

- a.- Los electrodos deben ser de material inalterable a la corrosión y mecánicamente resistentes. Pueden ser de cobre o hierro galvanizado.

JUSTIFICACIONES

Esta norma se debe al efecto del terreno para atacar los materiales metálicos por la corrosión.

El cobre y el zinc, son pocos atacados por la oxidación. El gráfico 4, pag. 57 nos muestra las diferentes penetración en función del tiempo.

Inicialmente la corrosión no afecta a la resistencia de tierra, pero según el gráfico 4 se observa que con los años, el cobre y el zinc resisten a la corrosión mucho más que el hierro.

Según pruebas de fabricantes de electrodos el promedio en pérdidas de peso de varillas de 15 cm X 2,5 cm enterrado por 12 años era de 0,2 % por año para el cobre. Para un material ferroso era de 2,2 % por año y para hierro galvanizado era de 0,5 % por año.

b.- Estos pueden ser de forma de varillas, tubos, platinas o planchas.

c.- La longitud estará de acuerdo a la resistencia a tierra de diseño y la resistividad del terreno pero debe estar enterrado en un mínimo de 2 metros.

JUSTIFICACION

La longitud mínima de 2 metros se debe, que por experimentación, a esta profundidad, en la mayoría de los terrenos se conserva una humedad relativamente alta con respecto a la superficie. Además en lo que concierne a resistencia veremos las diferentes longitudes de electrodos en diferentes terrenos, explicados en el gráfico 5. pag.58. Por ejemplo; terreno A: arcilla, pizarra y terrenos fangosos, con proporciones de arena y grava, tienen resistencia media de 15.000 ohmios por cm^3 . Terreno tipo B: terrenos fangosos, sin arena y grava; tiene resistencia media de 4.000 ohmios por cm^3 .

Realmente al lograr mayores profundidades de enterrado se encuentra más humedad, aumentando por consiguiente la conductividad; pudiéndose conseguir mayores reducciones de la resistencia de puesta a tierra. (ver fig. 6 pag. 59 y fig. 7 pag. 60)

Para calcular la longitud del electrodo puede emplearse la ecuación:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (1)$$

En donde el término $\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right)$ tiende a la unidad, tendremos una aproximación:

$$R = \frac{\rho}{L} \quad L = \frac{\rho}{R} \quad (2)$$

En donde:

R= resistencia de tierra en ohmios

L= longitud del electrodo en metros

ρ = resistividad del terreno en ohmio· m.

d= diámetro del electrodo en metros

d.- Las tuberías de las instalaciones de agua o gas no deben usarse como electrodos de puesta a tierra.

JUSTIFICACION

No debe usarse las cañerías de agua como un medio de obtener electrodos de tierra, porque ahora se está usando muchos materiales no conductores para líneas principales como de consumidores, tales, como asbestos y plásticos, además para uniones se utilizan anillos de caucho o teflón.

e.- El diámetro de los electrodos en varillas debe

ser mínimo de 15 mm, y para tubos 20 mm de diámetro interior.

JUSTIFICACION

De la ecuación:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (3)$$

Vemos que el diámetro d del electrodo, está en la ecuación en un argumento logarítmico, de donde se deduce que la influencia de este valor sobre la resistencia es tan pequeña, que el diámetro obedece a consideraciones de orden puramente mecánico. La ecuación nos muestra la pequeña variación de resistencia para diferentes diámetros; esto lo podemos ver mejor en los gráficos 8 pag. 61 y 8a pag. 62 o' en los siguientes ejemplos:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4 \times 2}{0,15} - 1 \right) = 2,97 \text{ K ohmios}$$

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4 \times 2}{0,30} - 1 \right) = 2,28 \text{ K ohmios}$$

Donde $K = \frac{\rho}{2 \pi L}$

- f.- Las platinas de cobre serán de 50 mm cuadrados de sección y 3 mm de espesor; las galvanizadas serán de 120 mm cuadrados de sección y 4 mm de espesor como mínimos.

g.- Las planchas deben tener un espesor de 2 mm en cobre y 2,5 mm en galvanizadas con una superficie de 0,50 metros cuadrados de una sola cara, como mínimos; además deben estar perforadas.

JUSTIFICACION

El sistema de planchas es sólo recomendable en los terrenos en que la profundidad de la tierra vegetal es importante (1 a 1,50 m).

El empleo de estas planchas para puesta a tierra es menos racional porque la mayor parte de la corriente se concreta en las aristas, que tienen una superficie total muy pequeña.

Puede remediarse en parte este inconveniente, empleando planchas perforadas para aumentar de este modo la longitud de las aristas y a su vez la superficie.

Desde este punto de vista sería más práctico usar parrillas.

Cuando el terreno es poco húmedo, se disponen éstas en una fosa en la cual se coloca en estratos de carbón vegetal o coque, y sal.

h.- Cuando se colocan electrodos en paralelo, estos deben tener una separación entre sí, de una vez a vez y media la longitud del electrodo, cuando se

trata de varillas o tubos.

JUSTIFICACION

Cuando el subsuelo presenta una resistividad superior a la superficie, se puede disminuir la resistencia clavando dos o más electrodos en paralelo, los cuales se conectan entre si, y para que sus campos de acción no se interfieran deben estar separados a una vez a vez y media su longitud.

De las figuras 9 pag. 63 y 9a pag. 64 podemos hacer el análisis, que además de ser de orden técnico se puede hacer una consideración de tipo económico, porque las separaciones deben ser lo más eficientes para tener un ahorro de material. Como vemos en la figura 9a pag. 64 la resistencia comienza a disminuir considerablemente en las separaciones cortas hasta que en los 3 metros vemos que las distancias tienen poca influencia sobre la resistencia. Ahora como no se consigue mayor eficiencia al separarlos más, es necesario tener presente esta separación para tener un buen rendimiento y no tener un gasto inútil de material. En la figura 10 pag. 65 se presentan curvas de variación del coeficiente de aumento de resistencia K , dado por la ecuación:

$$K = n \frac{R}{R'} \quad \text{en función de } D/L \quad \text{siendo} \quad (4)$$

n = número de electrodos en paralelos

R' = resistencia del grupo de electrodos

R = resistencia individual de cada electrodo

D = distancia entre cada dos electrodos

L = longitud de enterrado de un electrodo

Como vemos en esta figura para la curva de dos electrodos y para un terreno de una misma resistividad, el valor del coeficiente K disminuye con una rata de variación considerablemente mayor hasta el valor $D/L = 1,5$ que para valores entre $D/L = 1,5$ y 3

i.- Dos electrodos usados para conectar a tierra dos sistemas diferentes, deben tener una distancia entre electrodos de una vez su longitud, pero como mínimo 2 metros.

j.- La superficie de los electrodos deben estar completamente limpias, exentos de pinturas, esmaltes, grasas, aceites o cualquier material que sea mal conductor de la electricidad.

k.- La parte superior del electrodo debe estar enterrado bajo el nivel del terreno por lo menos 30 centímetros.

JUSTIFICACION

Bajo condiciones de falla, en el electrodo de tierra aparece una diferencia de potencial con respecto a la masa general de tierra, la cual puede ser calculada con la corriente de falla y la resistencia del electrodo de toma de tierra.

La presencia de estos voltajes en el suelo alrededor del electrodo, pueden ser perjudiciales para líneas telefónicas y resultan un peligro para la vida humana.

El primer riesgo proviene principalmente de la conexión de grandes sistemas de electrodos, tal como sucede en plantas generadoras de energía y subestaciones.

El peligro para la vida ocurre principalmente en subestaciones donde se debe poner a tierra el neutro.

De la experiencia se ha podido observar por ejemplo que, cuando se entierra la parte superior de un electrodo bajo el nivel del suelo a 30 y 100 cm., la gradiente de potencial que corresponde cuando está a nivel, se reduce en un 30 % y 50 % respectivamente, esta consideración debe tenerse presente en el diseño de puestas a tierras en subestaciones.

Para ver como se reparte la gradiente de poten-

cial de un electrodo de forma semiesférica, ver fig. 11 pag.66

La resistencia será la suma de una serie de semiesferas concéntricas al electrodo. La intensidad del campo eléctrico en cualquier punto sobre la superficie del terreno a una distancia X del centro del electrodo está dada por la ecuación:

$$e_x = \rho i = \frac{\rho I}{2\pi x^2} \quad (5)$$

- e_x = intensidad de campo
- ρ = resistividad del suelo, ohm.m
- I = corriente de falla, amperios
- x = distancia, metros

La diferencia de potencial entre la superficie del electrodo y un punto distante x del centro del electrodo es por lo tanto:

$$E_x = \int_r^x \frac{\rho I}{2\pi x^2} dx$$

$$= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{r} \right) \quad (6)$$

Graficando la ecuación anterior obtenemos una curva como la mostrada en la figura 12. pag. 67 Se observa de la curva que existe mayor diferencia de potencial cerca del electrodo. Por ejemplo si una persona se acerca caminando ha-

cia el electrodo que está conduciendo corriente, puede ser peligroso ya que el paso normal es 0,80 metros.

- 1.- Los electrodos de puesta a tierra de sistemas eléctricos, deben tener tal capacidad de corriente que no produzca una elevación de temperatura mayor de 90 grados centígrados en el terreno, ya que esto afecta la resistencia de tierra.

JUSTIFICACION

La capacidad para conducir la corriente por los electrodos puede entenderse de 4 maneras:

- 1.- Duración larga de falla cuando la corriente a tierra es insuficiente para operar los equipos de protección instalados para interrumpir el circuito.
- 2.- Duración corta de carga, cuando el mecanismo de protección opera en forma normal.
- 3.- Duración larga de falla, la cual ocurre cuando no operan correctamente los mecanismos de protección o cuando es puesto a tierra a través de un limitador de corriente y es posible la operación continua con una falla a tierra sobre una fase.
- 4.- Duración larga de falla con pequeñas corrientes.

Cuando está circulando corriente en un circuito que contiene resistencias, el calentamiento resulta como una consecuencia natural de la disipación de la energía eléctrica.

La cantidad de energía eléctrica, absorbida por una resistencia de R ohmios con una corriente de I amperios es $I^2 R$ vatios.

En el caso de un electrodo de tierra, el resultado de la absorción de energía calorífica es la evaporación de la humedad alrededor del electrodo.

Como la resistencia es concentrada cerca al electrodo este efecto es más pronunciado en las cercanías de éste.

Como sabemos que la resistividad del suelo está de acuerdo al porcentaje de humedad, al reducirse ésta, aumentará la resistividad. ver fig. 3 pag. 55. El resultado de esta reducción de humedad será el aumento de la resistencia del electrodo hasta tal punto que la carcasa de cualquier equipo conectado a él, se convertirá en una parte viva. Hay sin embargo dos factores, los cuales en circunstancias normales tienden a disminuir este efecto.

Primero.- La humedad tiende a circular por acción

de capilaridad desde una posición donde de el suelo está húmedo a un suelo seco. Si la evaporación no es suficiente, la humedad perdida será transferida para balancear esta evaporación.

Segundo.- Cuando la temperatura del suelo se incrementa, la resistencia decrece manteniendo el mismo contenido de humedad, como podemos observar de la tabla siguiente:

TEMPERATURA Y RESISTIVIDAD DE ARCILLA ARENOSA

TEMPERATURA	RESISTIVIDAD
20° C	7.500 ohm/cm ³
10° C	9.900 ohm/cm ³
0° C	13.800 ohm/cm ³
-5° C	79.000 ohm/cm ³
-10° C	330.000 ohm/cm ³

Tomemos como ejemplo la forma más simple de electrodo: una esfera.

Donde la corriente I esta circulando a través de la esfera de radio r, la resistividad del terreno está dado en ohmios por centímetros cúbicos y la conductividad térmica en vatios/centímetros

cúbicos/ grado centígrado. La energía total en vatios que una esfera diferencial por segundos a distancia radial x está dada por:

$$H = -4\pi x^2 \lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (7)$$

Donde θ es la temperatura del suelo a una distancia x . Esto es igual al calor total generado en la esfera, dado por $I^2 R$, donde R es la resistencia del suelo desde el electrodo a una distancia x .

Entonces.

$$-4\pi x^2 \lambda \frac{d\theta}{dx} = I^2 \int_r^x \frac{\rho}{4\pi x^2} dx$$

$$\theta = \frac{\rho I^2}{16\pi^2 \lambda x} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{2x} \right] \quad (8)$$

Haciendo una aplicación como ejemplo:

$$\rho = 10.000 \text{ ohmios/cm}^3$$

$$\lambda = 1.0 \times 10^{-2} \text{ vatios/cm}^3/\text{ }^\circ\text{C}$$

$$r = 50 \text{ cm}$$

$$I = 5\text{A}$$

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} = \frac{10.000}{4\pi \cdot 50} = 15,9 \text{ ohmios}$$

$$H = I^2 R = 5^2 \cdot 15,9 = 396 \text{ vatios}$$

Se asume que el calor es transmitido al suelo, entonces la máxima temperatura del suelo es dado por:

$$\theta_m = \frac{\rho I^2}{32\pi^2 \lambda x^2} = \frac{\rho I^2}{32\pi^2 \lambda r^2}$$

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

$$\theta_m = \frac{I^2 R}{8\pi \lambda r}$$

$$H = I^2 R$$

$$\theta_m = \frac{H}{8\pi \lambda r} \quad (9)$$

Sustituyendo

$$\theta = \frac{396}{8\pi \times 1,0 \times 10^{-2} \times 50} = 33^\circ \text{ C}$$

Ahora

$$I = \frac{4\pi r}{\rho} \sqrt{2\theta_m \lambda \rho} = \frac{1}{R} \sqrt{2\theta_m \lambda \rho} \quad (10)$$

Con lo cual concluimos, si θ es asumida constante, el voltaje permisible aplicado es independiente de la medida del electrodo y depende sólo de las características del suelo.

La corriente permisible para cargas continuas de cualquier electrodo, puede calcularse como ya hemos visto.

Ahora asumiendo que la evaporación comienza cuando el suelo alcanza 100°C , nosotros tenemos:

$$E = \sqrt{200 \lambda \rho} \quad (11)$$

Y para el ejemplo anterior sería

$$E = 141 \text{ voltios}$$

Si la resistencia del electrodo es 1 ohmio la máxima corriente es 141 amperios, mientras que para una resistencia de 10 ohmio la máxima corriente será 14,1 amperios.

Asumimos que la temperatura del suelo no afectado por la corriente de falla esta a 0°C .

Para la ecuación general tomamos como $t^{\circ}\text{C}$ la temperatura del suelo, la ecuación es:

$$E = \sqrt{2 (100-t) \lambda \rho} \quad \text{voltios} \quad (12)$$

Y la corriente permisible es reducida.

Cuando la duración de la carga es corta, la corriente es tan grande que podemos ignorar las pérdidas de calor debido a la conducción, y la temperatura del suelo crece en el terreno circunvecino a los electrodos, y este es proporcional al calor generado en cada unidad de volumen; asumiendo constante la capacidad de calor del suelo tenemos:

i = densidad de corriente en la superficie del electrodo, en amperios

ρ = resistencia específica del suelo en ohmios

ρ = densidad del suelo gr/cm³

C = calor específico del suelo

θ = crecimiento de temperatura del suelo en °C

t = tiempo en segundo

$$\rho C \theta = 0,24 i^2 \rho t \quad \theta = \frac{0,24 i^2 \rho t}{\rho C} \quad (13)$$

Dada las dimensiones de un electrodo y substituyendo valores para varias densidades de corriente, pueden ser calculadas diferentes θ .

Resumiendo lo antes dicho, el voltaje permisible aplicado se incrementa con el área y esto da un método de combinar la baja resistencia con capacidad alta de carga. Supongamos que la resistencia deseada es obtenida usando platinas o grupos de tubos enterrados, entonces la capacidad de carga puede ser incrementada, incrementando la sección de la platina o el diámetro del tubo y al mismo tiempo la resistencia será ligeramente reducida.

En las tablas a continuación se puede obtener una referencia para calculos aproximados.

PROMEDIOS DE CORRIENTES DE CORTA DURACION

(Para electrodo de cobre de 2,50 m de largo y

16 mm de diámetro)

RESISTIVIDAD	DURACION DE LA FALLA (seg.)				
	ohm. cm	1	2	3	4
1.000	292	206	169	146	131
2.000	206	146	119	103	98
3.000	169	119	97	84	74
4.000	146	103	84	75	65
5.000	131	84	75	65	58

Para otra forma de electrodos y medidas debe em
plearse la siguiente tabla.

Tipo de electrodo Factor de multiplicación

Varilla sólida 16mm \varnothing $\frac{L}{8}$

Platinas de cobre 25X3mm $\frac{L}{2,74}$

Planchas de hierro 700X700mm 6,1

L = en pies (30,48 cm)

Puede emplearse la fórmula siguiente para calcul
lar densidades permisibles para terrenos de cierta
ta resistividad.

$$i = \sqrt{\frac{2,400}{\rho t}} \text{ amp/pulg}^2 \quad (14)$$

2.- RESISTENCIAS

- a.-Las puestas a tierra deberán estar dispuestas de tal manera, que bajo las condiciones normales de servicio no habrá corrientes de fuga por el circuito de puesta a tierra.

JUSTIFICACION

Si se produce un contacto accidental en el circuito en la parte exterior del edificio, circulará una corriente a través del conductor neutro de acometida y de las conexiones de puesta a tierra de la acometida, y aumentará la tensión, con respecto a tierra del neutro en el interruptor de acometida, en un valor igual al producto de la intensidad por la resistencia del circuito a tierra.

Casi siempre se utiliza un solo conductor de puesta a tierra para el sistema y el equipo.

El tubo de acometida, la caja del interruptor y el conductor de puesta a tierra están todos conectados juntos, en la forma en que se indica en la figura 13 pag. 68

En el momento que una corriente de fuga penetra en el edificio, bien a través del conducto de acometida o del conductor neutro y va a tierra; hará que el potencial en el conducto o en la ca-

ja aumente con respecto a tierra.

Cualquier circulación continuada de corriente que penetre en el edificio bien a través del conducto de acometida o del conductor neutro, que haga crecer el potencia respecto a tierra de la caja del interruptor, o de otros componentes hasta un valor apreciable; es un ejemplo de corrientes hay que considerar que pueden secar el suelo alrededor del electrodo, y por consiguiente se aumenta la resistencia de la puesta a tierra.

b.-Si hubiera corrientes de fuga debido al uso de puesta a tierra múltiples, una o más tomas deberán ser abandonadas o su situación cambiada.

c.-La resistencia de tierra debe ser de tal valor, que las corrientes que circulan por defecto o anormalidades no puedan dar lugar a tensiones de contacto superiores a 50 voltios. La resistencia para las instalaciones interiores deben ser menor de 5 ohmios.

JUSTIFICACION

Para llegar a tener una razón de esta norma, es necesario considerar las características eléc -

tricas del cuerpo humano y los efectos, al paso de la corriente de intensidad variable a través de diferentes partes del cuerpo.

El cuerpo humano entra en contacto con una fuente de energía eléctrica de muchas maneras. Tales contactos generalmente son accidentales pero en algunas ocasiones son por tratamiento médico o para pruebas de equipos de alto voltaje. Para que haya circulación de corriente a través del cuerpo, éste debe estar en contacto con dos objetos de voltajes desiguales, de tal manera que el cuerpo forme parte del circuito eléctrico en el cual la corriente puede fluir. Unos de estos objetos puede ser por ejemplo; una superficie a tierra o una reja metálica en contacto directo con tierra.

También es posible que el contacto pueda ser hecho por diferentes partes del cuerpo.

La corriente pasando desde las manos, a través del cuerpo, los pies y tierra. En ocasiones ambas manos pueden ser los puntos de contactos o desde un pie a otro; por ejemplo cuando una persona camina cerca de algún electrodo de tierra que está conduciendo corriente. La última condición, es la menos peligrosa, porque la corrien-

te no circula a través de las partes del cuerpo más fácilmente afectado; el corazón y sus tejidos adyacentes. Por lo tanto el contacto más peligroso es el que se realiza entre las manos y los pies y desde mano a mano, por que la corriente pasa a través de partes vulnerables del cuerpo.

Trabajos de investigación sobre los efectos de la corriente, se han llevado a cabo en cuerpos humanos hasta que ésta produzca sensaciones desagradable, comenzando desde cero la corriente hasta un valor de 0,9 mA a 50 ciclos; con las manos agarradas a un tubo de 20 mm de diámetro, En este punto, los experimentadores en Zurich, han encontrado que el hombre siente efecto de hormigueos por el estímulo al nervio sensorial de la piel.

Esta corriente es conocida como la corriente umbral de sensación.

Cuando la corriente es incrementada a 15 mA a 50 ciclos, el hombre es incapaz de controlar sus músculos afectados. Es el primer punto peligroso porque la persona sería incapaz de moverse del punto del shock, puede sin embargo utilizar en esta etapa músculos no afectados para separarse.

Si los músculos afectados son aquellos que controlan la función respiratoria, se paraliza la respiración. Más allá de este punto se recogieron experiencias sobre animales, que tuvieran ciertas características semejantes.

Para posteriores experimentos se tomó ovejas, las cuales, el peso del cuerpo, del corazón y los efectos de las corrientes pequeñas eran similares a las del hombre.

En muchos casos donde se paraliza la respiración puede después que aleje a la persona aplicarse la respiración artificial.

Algunas veces corrientes más altas que las que se necesita para paralizar los músculos, pueden ser fatales, aunque sean de corta duración.

Bajo estas condiciones la muerte es causada por FIBRILACION VENTRICULAR, la cual es una interrupción del funcionamiento normal del corazón.

Esta condición es una contracción asincrónica no coordinada de las fibras musculares ventricular, en contraste a sus contracciones normales rítmicas y coordinadas, siendo una estimulación anormal la cual causa daños al corazón.

Con esta condición cesa la acción de bombeo, falla la circulación y como resultado es la muerte en pocos minutos. ver fig. 14 pag. 69

Por experimentación se ha demostrado que este

efecto bajo ciertas condiciones, puede ser contrarrestado por la aplicación de contra shock de alta intensidad y corta duración si es aplicado a los pocos minutos, además no debe de dejarse aplicar la respiración artificial. El valor de la corriente la cual trae esta condición es la máxima corriente que puede recibir una persona de un peso promedio de 70 kg, el cual su corazón pesa 330 gr. I siendo la corriente umbral para un animal de 70 kg. es alrededor de 0,26 amperios y, la correspondiente a un corazón de 330 gr. es de alrededor de 0,29 amperios. Debemos anotar que una experimentación en 25 ovejas el 44 % la mínima co-rriente de fibrilación fue de 0,1 amperios a 50 ciclos.

El voltaje necesario para producir la corriente de 0,1 amperios, en un contacto depende de la resistencia del cuerpo.

Ahora sabemos que la resistencia promedio de mano a mano es del orden de 8.000 a 9.000 ohmios. Con ambas manos húmedas esta resistencia cae alrededor de unos 1.500 ohmios y cuando estan impregnadas en agua sal la resistencia es alrededor de unos 1.000 ohmios.

Ahora para seguridad consideramos una resisten-

cia de 500 ohmios, con esta resistencia necesitamos un voltaje de 50 voltios para producir la corriente de 0.1 amperios. Es por esta razón que las medidas de protección deben ser tomadas en cuenta en circuitos de bajo voltaje.

A continuación está una lista en la cual se indica la resistencia que debe usarse en cada caso, estas resistencias son tomadas de normas internacionales:

Proximidades de central generadora	5 ohms
Proximidades de centro de transformación	5 ohms
Para instalaciones interiores	5 ohms
Para columnas y apoyos accesibles	5 ohms
En pararrayos	10 ohms
Para tanques y cañerías conteniendo líquidos inflamables	10 ohms
En pararrayos de edificios que contienen sustancias inflamables y explosivas	7 ohms

- + d.-Las resistencias deben ser chequeadas por lo menos cada dos años, y hacerlo durante el tiempo más seco de la zona.

e.-Cuando se use compuestos químicos, para mejorar el terreno que tiene alta resistividad tales como: sal común, cloruro de calcio sulfato de cobre, o magnesio; deben estar colocados alrededor de los electrodos a una distancia mínima de 20 centímetros.

JUSTIFICACION

Esta separación de 20 centímetros se la hace con el objeto de que estas sustancias químicas no estén en contacto directo con los electrodos, las cuales provocarían una oxidación, que traería una alteración en la resistencia de puesta a tierra.

La forma que deben colocarse los productos químicos en el terreno se la puede ver en la figura 15. pag. 70

A continuación está una tabla en la cual se indica la resistividad promedio de algunos tipos de terreno.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD en ohm.m
Terrenos pantanosos	hasta 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Arcilla plástica	hasta 50
Arcilla compacta	100 a 200

Arena arcillosa	50 a 500
Arena sílica	200 a 1.000
Suelo pedregoso cubierto de cesped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 200
Rocas de mica y cuarzo	hasta 800

V.-CONDUCTORES

1.-Generalidades

a.-En todos los casos el conductor a tierra debe ser de cobre o de otro material que no se altere por la corrosión; y sin uniones o empalmes.

Si las uniones o empalme son inevitables deben estar hechas y mantenidas de modo que satisfagan los requisitos de resistencia. Cuando se unen a los electrodos con soldadura, ésta debe ser de alto punto de fusión.

b.-Para los pararrayos el conductor debe ser tan corto como sea posible y libre de ángulos pronunciados.

JUSTIFICACION

Los sistemas de puesta a tierra en pararrayos deben dispersar en el terreno descargas a frecuencias elevadas. Por lo tanto, los conductores deben conducir estas corrientes de alta frecuencia y con frente escarpado. Para estas corrientes, tiene influencia preponderante la impedancia de onda del sistema de conductores de conexión a los electrodos, que debe ser lo más baja posible teniendo mucha influencia la longitud; y los ángulos pronunciados, los cuales pueden ocasionar chispas por efecto de la acumulación de cargas en las puntas.

2.-Capacidad

a.-Para circuitos de corriente continua.

Un conductor a tierra para un sistema de alimentación de corriente continua debe tener una capacidad de conducción de corriente no menor a la del mayor conductor del sistema alimentado, y en ningún caso a la del número 8 AWG ($8,37 \text{ mm}^2$) en cobre o su equivalente en aluminio.

b.-Para circuitos de corriente alterna

El conductor neutro de las acometidas debe

ponerse a tierra y debe tener una capacidad de corriente mínima a la del número 8 AWG ($8,37 \text{ mm}^2$) en cobre o su equivalente en aluminio.

c.-Para canalizaciones y equipos.

La capacidad conductora de corriente de los conductores a tierra para equipos, canalizaciones, blindajes de cables y otras cubiertas, cuando estén provistas de protección contra sobrecargas; debe ser suficiente para proveer la circulación adecuada de la corriente producida por la falla, durante el tiempo requerido para que el dispositivo protector opere. Debe ser como máximo el número 6 en cobre AWG ($13,20 \text{ mm}^2$) o su equivalente en aluminio.

d.-Para transformadores de instrumentos.

La capacidad conductora de corriente de los conductores a tierra para cajas de instrumentos y circuitos secundarios de transformadores de instrumentos, debe ser igual al número 12 AWG ($3,31 \text{ mm}^2$) en cobre, o su equivalente en aluminio.

e.-Para pararrayos.

El conductor de puesta a tierra en pararrayos debe ser de una sección mínima al número 6 AWG ($13,30 \text{ mm}^2$) en cobre, o su equivalente en aluminio.

f.-Para equipo portátil o colgante.

Para poner a tierra un equipo portátil o colgante cuyos conductores estén protegidos por fusibles o interruptores de circuito, determinados o graduados para una capacidad no mayor de 15 amperios, puede usarse conductor número 18 AWG ($0,82 \text{ mm}^2$) en cobre.

JUSTIFICACION

La capacidad de los conductores de puesta a tierra para neutros, equipos, deben tener tales capacidades para que cuando fluya corriente por efectos de fallas, no ofrezcan mayor resistencia y a la vez puedan conducir sin sufrir alteración por efecto de recalentamiento.

El conductor de los pararrayos para puestas a tierra debe tener una capacidad conductora de corriente, suficiente para asegurar la continuidad y efectividad constante de la conexión a tierra, bajo condiciones de exceso de corriente causados por la descarga del pararrayos.

La capacidad debe estar en función de la cantidad de corriente, el tiempo de descarga y la resistencia de tierra.

Estas consideraciones se basan en dos puntos:

Primero: La intensidad de cresta de los rayos y el porcentaje en que estos se producen.

Estadísticas llevadas a cabo en Europa se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Así resultó que el 7 % de los rayos es superior a los 40.000 amperios y para intensidades menores a los 10.000 amperios era el 40 %.

Además los valores de las intensidades de cresta que aparecen en los pararrayos de las estaciones transformadoras son menores, debido a que desde la iniciación de la onda hasta llegar al pararrayos sufren un amortiguamiento debido a la impedancia de la línea.

Segundo.- El tiempo de duración de la descarga y el tiempo que puede soportar esa descarga el conductor a tierra para llegar a su punto de fusión.

Los pararrayos están regulados para hacer las descargas en microsegundos, y el punto de fusión del conductor de cobre número 6 AWG. está a 0.1 segundos sobre los 10.000 amperios según lo de-

muestra la figura 16. pag. 71

Esta curva puede calcularse a base de la ecuación:

$$33 \left(\frac{I}{A}\right)^2 S = \log \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right) \quad (15)$$

donde

I= amperios

A= sección (circular mils)

S= tiempo de aplicación de la corriente(seg)

T_m = Punto de fusión del cobre en grados centígrados.

T_a = temperatura ambiental en grados centígrados.

3.- IDENTIFICACION

a.- Los conductores de tierra de una instalación eléctrica interior deben estar identificados en la instalación a lo largo de todo el sistema.

b.- Para identificación deben tener alguna señal en sus extremos o su aislante deberá ser de color blanco si es neutro a tierra o color verde si es tierra para equipos.

c.- Las platinas para tomas de tierra en los ta

bleros deben estar identificados con color blanco.

4.-PROTECCION MECANICA Y CONTRA CONTACTO.

a.-Cuando el conductor esté expuesto a daño mecánico debe protegerse con un ducto o algún otro tipo de protección.

b.-Los protectores para los conductores de tierra de los pararrayos deben ser de material no magnético, a menos que el conductor esté conectado eléctricamente a los dos extremos del protector.

JUSTIFICACION

La razón para que no sean magnéticos los protectores se debe a los efectos de inducción que causan las corrientes de alta frecuencia de los rayos.

c.-Los protectores deben prolongarse por una distancia o altura mayor de 3 metros de cualquier terreno o plataforma, donde los conductores estén accesibles al público.

d.-Si se conectan electrodos en paralelo los conductores deben ser tendidos flojos para evi-

tar roturas.

e.-Para conectar los conductores a los electrodos de tierra y a los equipos, debe ser hecho a presión, empleando grapas o pernos procurando que sean del mismo material que los conductores.

VI.-EN SISTEMAS ELECTRICOS

A.-APLICACION

a.-Circuitos de corriente continua.

- 1.-Cuando tienen dos conductores que alimentan instalaciones interiores, y que funcionan con tensiones no superiores, a 300 voltios entre fase, deben tener puestas a tierra; a menos que se utilice dicho sistema para alimentar equipos industriales en zonas limitadas y el circuito esté equipado con un detector de corrientes a tierra.

- 2.-En los circuitos de corriente continua de tres hilos, el neutro debe conectarse a tierra.

b.-Circuitos de corriente alterna.

- 1.-En circuitos monofásicos de 3 conductores para alimentar hasta 240/120 el neutro debe ser puesto a tierra en el transformador como en cada servicio.

- 2.-En circuitos trifásicos de 3 conductores para alimentar maquinaria solamente, no necesitan el neutro puesto a tierra.

- 3.-Un sistema trifásico secundario de cuatro con

ductores, deben tener el neutro conectado a tierra en cada servicio y en el transformador o en cualquier otro lugar del circuito.

JUSTIFICACION

Deben ponerse a tierra en cada entrada de acometida los sistemas secundarios de corriente alterna que a continuación se indican. Usualmente están también puestos a tierra en el transformador, y se les puede poner a tierra en otros puntos del sistema de distribución. ver fig. 17 pag. 72. Monofásicos de 2 conductores, tierra en uno de los conductores.

Monofásicos de 3 conductores, tierra en el conductor neutro según figura 18. pag. 73

Trifásico de 4 conductores, tierra en el conductor neutro.

Sistema trifásico de 3 conductores y neutro tomado de un transformador de modo que se pueda tomar de una fase un sistema de 3 conductores para alumbrado; tierra en el neutro según figura 19 pag. 74. En este caso se puede utilizar sólo una fase, si se emplea el secundario para alimentar cargas trifásicas, porque con el neutro de una fase puesto a tierra, tal como se muestra en la fig. se diera tierra a cual -

quiera de las otras dos fases se produciría un corto circuito.

- 4.-Dos o más edificios servidos por una acometida única.

Si hay más de un edificio servido por una misma acometida, el conductor de puesta a tierra de la instalación de cualesquiera de los edificios que tienen una derivación alimentada por esta acometida, puede conectarse a un electrodo de puesta a tierra en dicho edificio, y debe hacerse en caso de un edificio que utilice dos o más derivaciones, alimentadas por dicha acometida.

JUSTIFICACION

En la figura 20, pag. 75 una acometida entra en el edificio A y sirve también a los edificios B y C por medio de conductores tendidos desde A y B, y desde B a C. Además de la tierra en la acometida, el neutro puede ser puesto a tierra en el edificio B y en el edificio C.

- 5.-Los circuitos secundarios de los transformadores de instrumentos ya sean de tensión o corriente, si la tensión con respecto a tierra,

de los primarios es más de 300 voltios deben conectarse a tierra.

Si los transformadores están en tableros, se conectarán a tierra cualquiera que sea el voltaje.

B.-CONEXIONES

a.-En sistemas de distribución de corriente continua.

1.-La conexión a tierra debe hacerse en la central de generación, más no en servicios individuales, ni en algún otro lugar del circuito interior.

JUSTIFICACION

Se debe sólo conectar en las estaciones generadoras para evitar los perjuicios que puedan ocasionar, entre los cuales está la electrolisis. La corriente de retorno puede infiltrarse en la tierra y en las instalaciones subterráneas, como por ejemplo: tuberías de agua y cubiertas de cables eléctricos o de comunicación.

La electrolisis se produce cuando la corriente sale de las estructuras metálicas subterráneas para filtrarse en tierra, es decir, donde las

estructuras son positivas respecto a tierra; la importancia del perjuicio que ello puede producir, es función de la clase de material de la intensidad de la corriente y del tiempo ver fig. 21 a-b. pag. 76. Un amperio filtrando de una manera continua durante un año puede descomponer de 6 a 9 kg de hierro o 34 kg de plomo en el punto donde la corriente sale de la estructura metálica.

b.-En sistemas de corriente alterna.

- 1.-Los circuitos secundarios de corriente alterna que haya que poner a tierra, deben tener en cada acometida individual una conexión a un electrodo de puesta a tierra.
- 2.-Los circuitos secundarios de corriente alterna abastecidos por un transformador fuera del edificio, debe ser conectado a tierra en el exterior de éste.
- 3.-En ausencia de tomas de tierra directas en todos los servicios del edificio, deben hacerse conexiones a tierra en el neutro con toma de tierra.

4.-La conexión a tierra de un sistema secundario de distribución, debe estar antes del interruptor general.

5.-En las instalaciones interiores que no están alimentados por un secundario de distribución exterior de corriente alterna, la conexión a tierra debe efectuarse en el generador, transformador o cualquier otra fuente de alimentación, en el tablero o antes del primer interruptor que controle el sistema interior.

VII.-EN EQUIPOS

A.-APLICACION

a.-Los materiales conductores que están al descubierto y contienen equipo eléctrico, o forman parte de este equipo, deben ponerse a tierra.

JUSTIFICACION

Si las partes metálicas al descubierto que no transportan corriente del equipo están bien puestas a tierra, se mantendrán al potencial de tierra o muy próximo a él. Si hay un fallo de aislamiento en cualquier conductor contenido en el equipo, por ejemplo en los devanados de un

motor, las partes metálicas no pueden alcanzar un potencial mucho mayor que el de tierra y por tanto no existirá el riesgo que al tocar una persona pueda recibir una descarga eléctrica.

b.-Las cubiertas, envolturas o corazas metálicas de los conductores y las canaletas o fundas metálicas deben conectarse a tierra.

c.-Las partes metálicas de un equipo fijo que no conduce energía eléctrica debe conectarse a tierra si:

1.-El equipo es alimentado por conductores en conductos o cubiertas metálicas de cualquier tipo (conduit, cable acorazado, etc.)

2.-El equipo está en una ubicación húmeda.

3.-El equipo está en ubicación peligrosa.

4.-El equipo tiene continuidad eléctrica con partes metálicas.

5.-El equipo opera a más de 150 voltios con respecto a tierra en cualquiera de sus terminales. Se exceptúa en los siguientes casos: Cubierta de interruptores o disyun

tores solamente accesibles a personal calificado para trabajos eléctricos, y transformadores montados en vigas de madera a una altura a más de 2,50 metros de la parte más accesible.

B.-CONEXIONES

a.-Se conectarán a tierra;

- 1.-Armazón y rieles de grúas, armazón de ascensores, cables de izar ascensores, divisiones y enrejados de equipos eléctricos.
- 2.-Equipo eléctrico en garajes, teatros, cines, estudios cinematográficos, equipos de rayos X.
- 3.-Aviso luminosos eléctricos y equipos asociados a ellos.
- 4.-Los equipos conectados por cordón y tomacorrientes, tales como: refrigeradoras, congeladores, acondicionadores de aire, lavadoras, secadoras, calentadores de agua, cocinas, etc. y si operan a más de 150 voltios.

5.-Los equipos portátiles cuando son operados en lugares conductores de corriente a tierra.

6.-Las cajas de instrumentos, medidores, relés etc. en circuitos que operan a menos de 750 voltios; debe procederse en la forma siguiente:

a.-Si no están instalados en tableros.

b.-Si están instalados en tableros cuyo frente tuviera o no partes contensión.

Para el primer caso se debe colocar una plancha de material aislante en el piso delante del tablero como protección del operador.

7.-En las cámaras de transformación, las partes metálicas de la cámara incluyendo carcazas de transformadores. ver fig. 22 pag. 77

8.-Las carcazas de motores y las cajas de control, se conectarán al neutro del sistema o a un circuito de tierra independiente. Los equipos que están alimentados por conductores en conductos metálicos y estos están

unidos con roscas y ajustados firmemente que asegure continuidad eléctrica, se considera puesto a tierra si el conducto está a tierra.

- 9.-Los equipos portátiles se conectarán a tierra con un conductor que va junto a los conductores del cordón de alimentación y además el enchufe debe tener una espiga para esa finalidad.
- 10.-El conductor a tierra de un circuito interior puede ser usado como el conductor a tierra de equipos, conductos, canaletas metálicas, envolturas de conductores, incluyendo el conducto de servicio o envoltura del cable de servicio, teniendo presente la capacidad conductiva.
- 11.-Las conexiones deben ser efectivas y permanentes.
- 12.-Los electrodos de tierra de sistemas eléctricos pueden usarse para puestas a tierra de equipos.

VIII.-EN PARARRAYOS

A.-EN CIRCUITOS PRIMARIOS

1.-El conductor de puesta a tierra de un pararrayo que protege un transformador, el cual alimenta un sistema de distribución secundaria, puede ser conectado de la forma siguiente:

a.-Por interconexión metálica al neutro del secundario, siempre que además de la conexión de puesta a tierra directa en el pararrayos, el sistema secundario forme parte de un sistema neutro de múltiples puestas a tierra, y además el neutro primario tenga al menos una conexión a tierra cada 400 metros.

2.-A través del estallador de chispa.

Cuando el secundario no está puesto a tierra, debe conectarse a través de un dieléctrico de aire que tenga una tensión de ruptura a 60 ciclos, de aproximadamente el doble de tensión del primario pero no mayor de 15 kilovoltios; además debe haber en el conductor de puesta a tierra del secundario otra conexión a una distancia no inferior a 6 metros del electrodo del pararrayos.

JUSTIFICACION

Algunas veces ha ocurrido que una descarga atmosférica ha producido un arco entre uno de los pasatapas del secundario, dando paso así a la alta tensión del primario al sistema secundario. Se disminuye la posibilidad de este accidente conectando el conductor de puesta a tierra de los pararrayos al neutro del secundario. Los pararrayos deben tener sus resistencias a tierra bien controladas.

IX.-EN AREAS PELIGROSAS

A.-Generalidades

Las recomendaciones de esta sección tratan principalmente de la aplicación de la puesta a tierra y de los puentes de unión para evitar los riesgos de fuego y explosión que resultan de la presencia de atmósferas inflamables. Esto incluye a los siguientes casos:

a.-Fallas entre los conductores activos y partes metálicas que no transportan corriente.

b.-Descargas atmosféricas

c.-Acumulación de cargas estáticas.

B.-Consideraciones generales

Los cuerpos conductores pueden estar puestos a tierra por casualidad, por ejemplo: Un tanque metálico en contacto íntimo con la tierra. Artificialmente, por medio de una conexión eléctrica entre el cuerpo y la tierra.

C.-Consideraciones especiales a la industria petrolera.

En la industria petrolera se requiere sistema de puesta a tierra y puentes de unión para dar pro-

tección adecuada contra los peligros de potenciales asociados con lo siguiente:

- a.-Sistemas eléctricos.
- b.-Chispas, arcos eléctricos o puntos de alta temperatura, causados por fallas eléctricas o corriente de fuga.
- c.-Chispas o arcos producidos por las descargas directas o indirectas de los rayos.
- d.-Chispas producidas por el flujo de cargas electrostáticas acumuladas, generadas por máquinas en funcionamiento o por el paso de aire, gas, vapor o líquidos en las plantas de procesamiento.
- e.-Donde existan instalaciones próximas a transmisores de radio de alta potencia, se debe tener especial cuidado con la posibilidad de corriente inducida .

D.-Aplicación a:

- a.-Sistemas eléctricos y equipos.
- b.-Estructuras, plantas de procesamiento y otros equipos no eléctricos. ver fig.23 pag.78

c.-Conexiones no intencionales

E.-Resistencias.

a.-En sistemas y equipos no mayor de 4 ohmios.

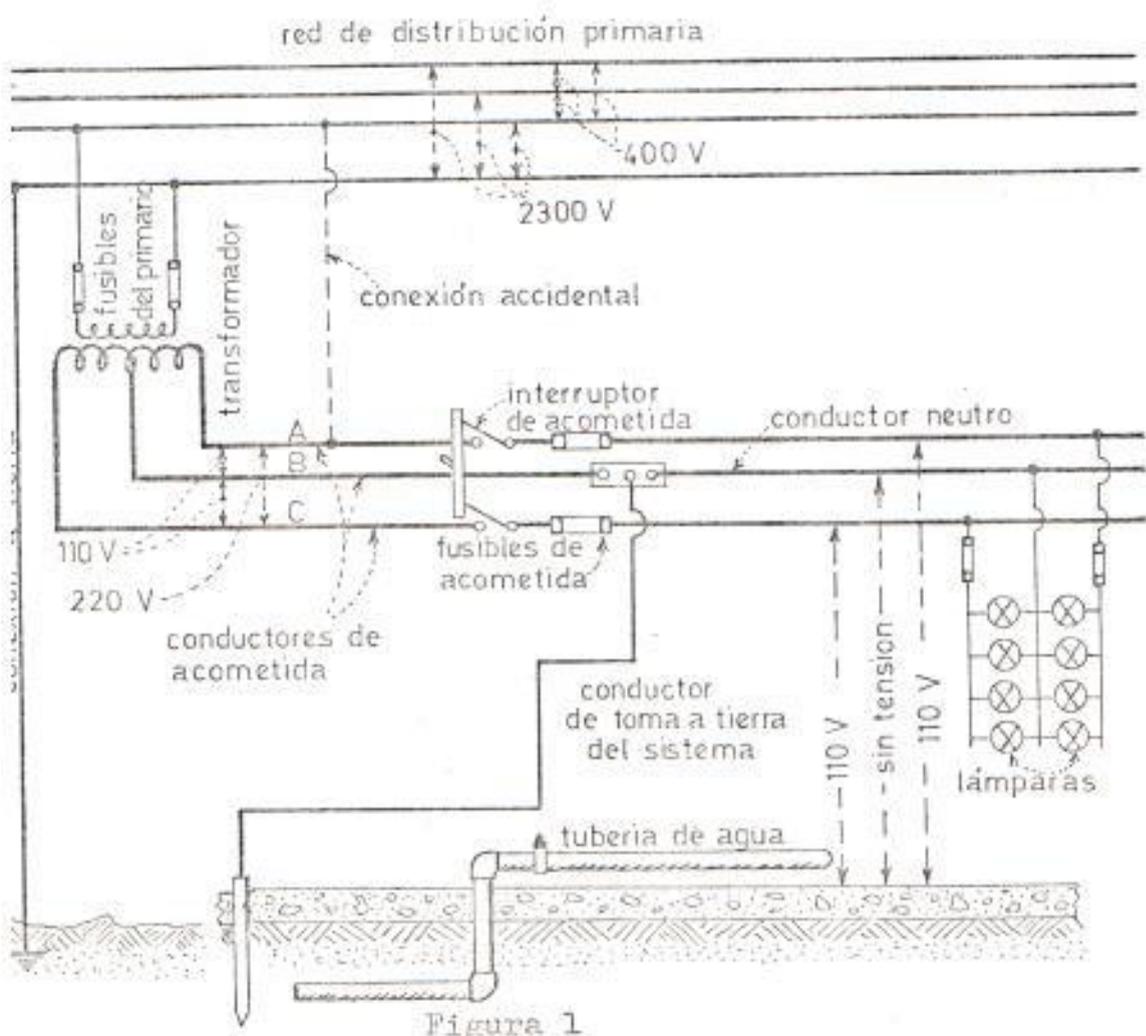
b.-En protección contra el rayo no mayor de 7 ohmios.

c.-En descargas de electricidad estática puede ser tan alto como un megohmio.

F.-Tuberías.

Las tuberías que no hagan contacto eléctrico con el tanque o depósito asociado, tal como una tubería abierta de descarga a un tanque, deben estar conectadas eléctricamente al tanque o depósito por medio de un conductor flexible y puesto a tierra.

El uso de protección catódica puede justificar que se intercalen bridas aislantes que interrumpen la continuidad eléctrica de la longitud total de tubería, pero en este caso debe ponerse a tierra ambos lados de donde está la brida.



SISTEMA DE INSTALACION INTERIOR CON UNA TIERRA DE SISTEMA EN LA ENTRADA DE LA ACOMETIDA

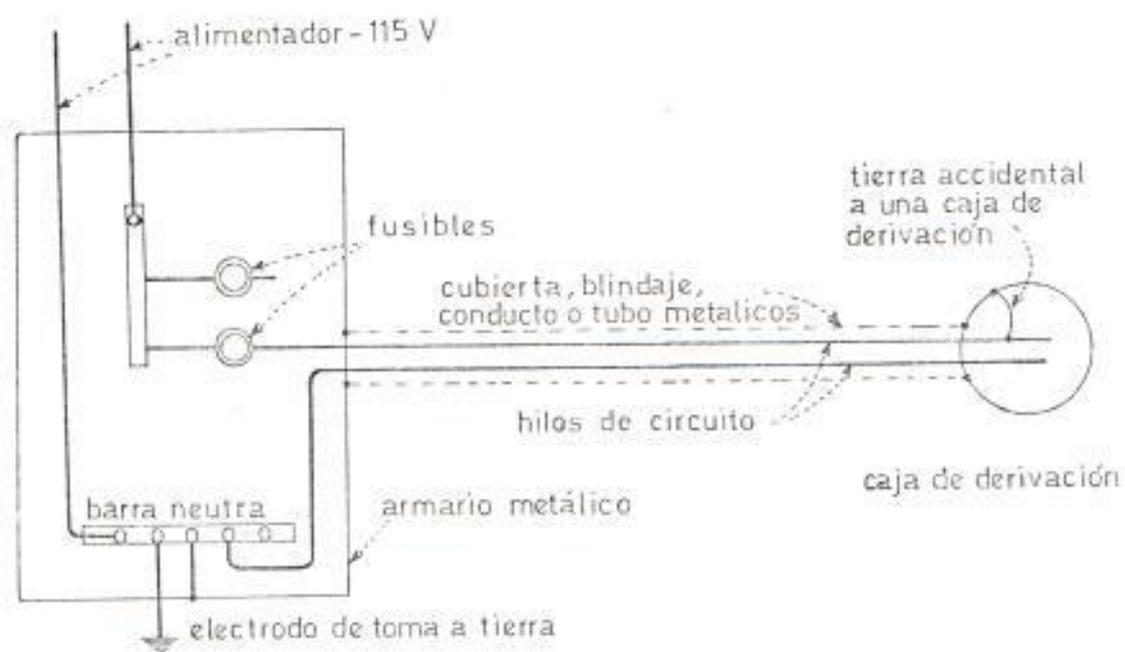
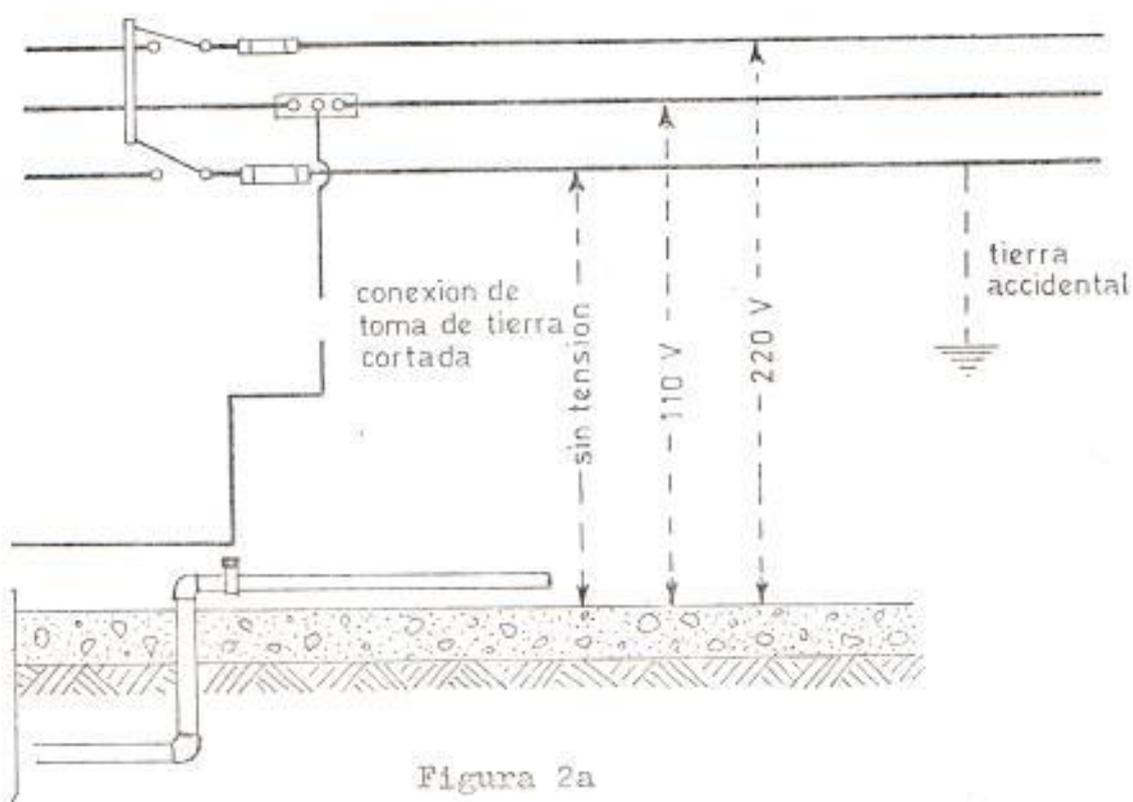


Figura 2

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN TABLERO DE DISTRIBUCION Y UNA DERIVACION QUE TIENE UNA TIERRA ACCIDENTAL EN EL CONDUCTOR ACTIVO



STEMA DE INSTALACION PERD CON EL NEUTRO NO PUESTO A TIERRA
 DICANDO LAS TENSIONES CON RESPECTO A TIERRA EN EL CASO DE
 UN CONTACTO ACCIDENTAL CON LA MISMA DE UN CONDUCTOR



Figura 3

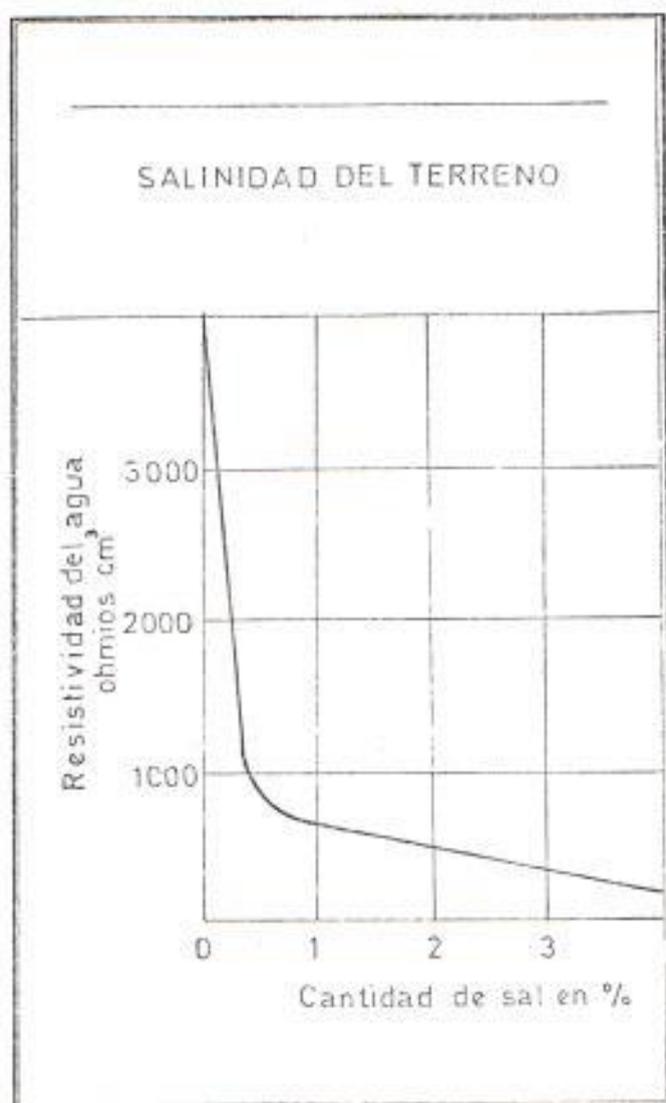


Figura 3a

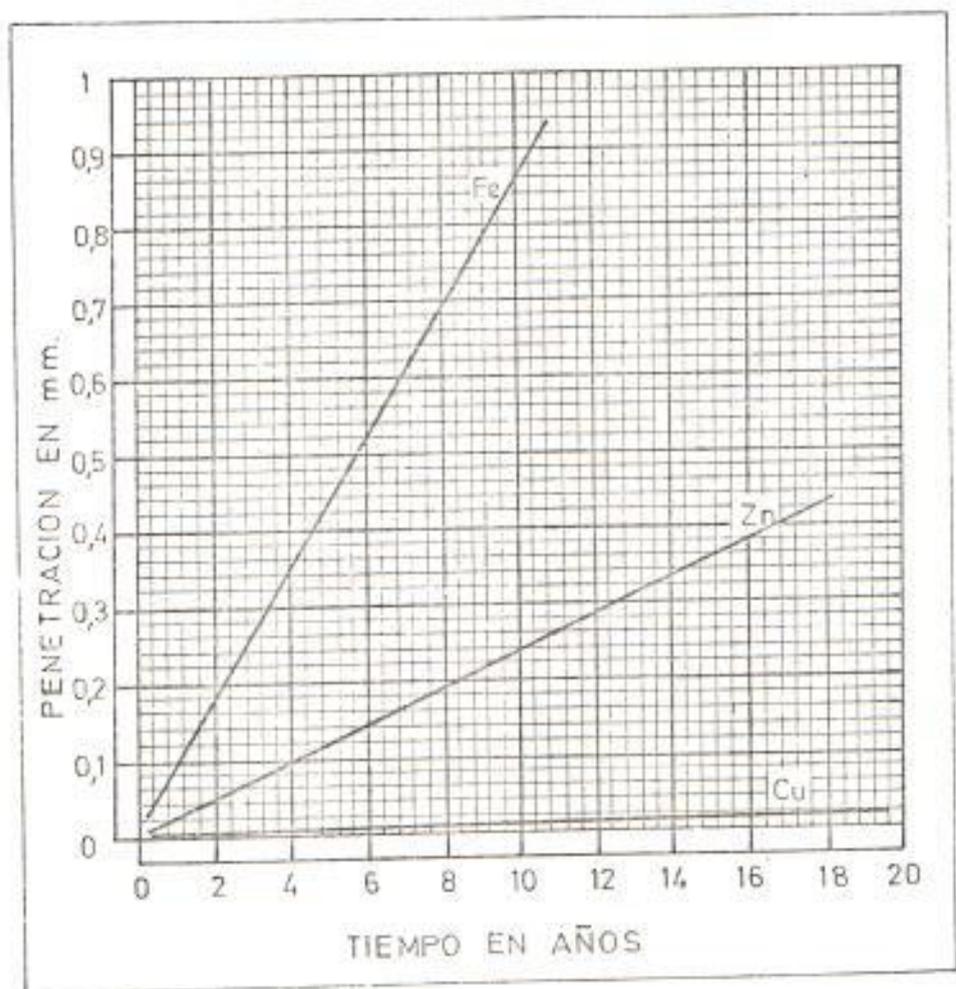


Figura 4

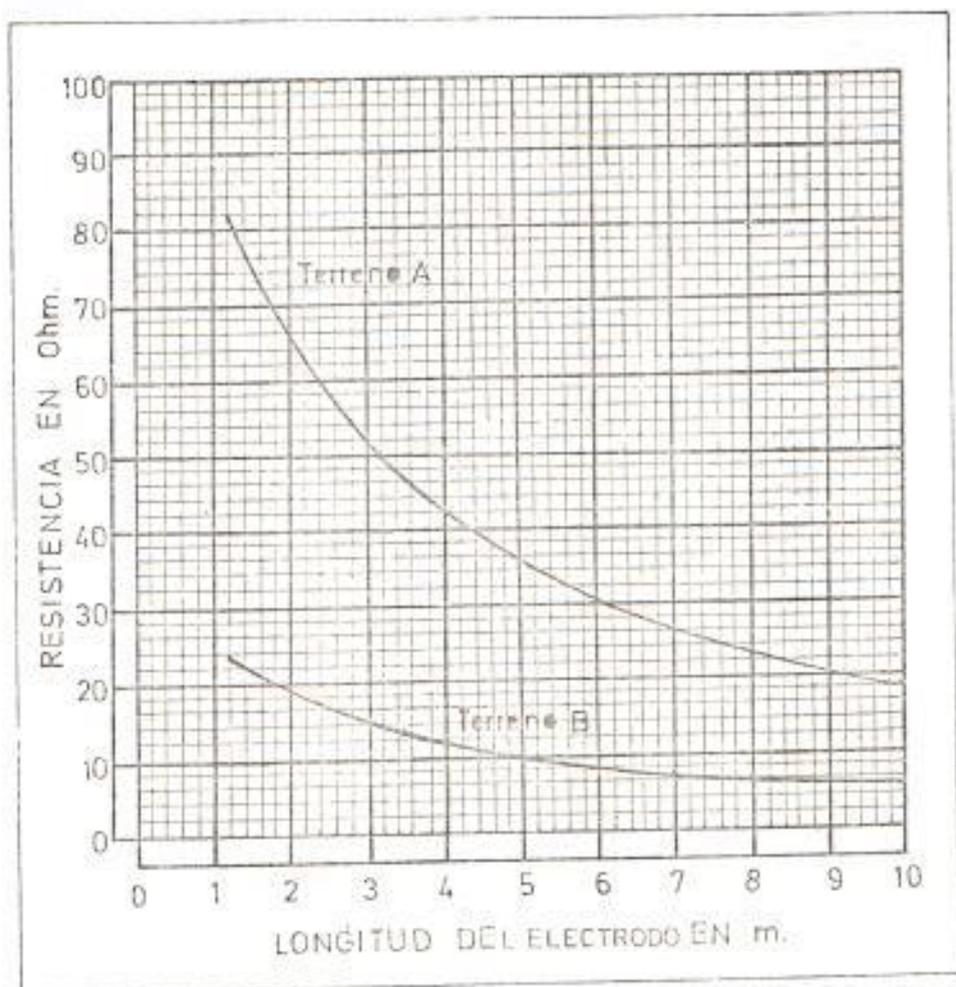
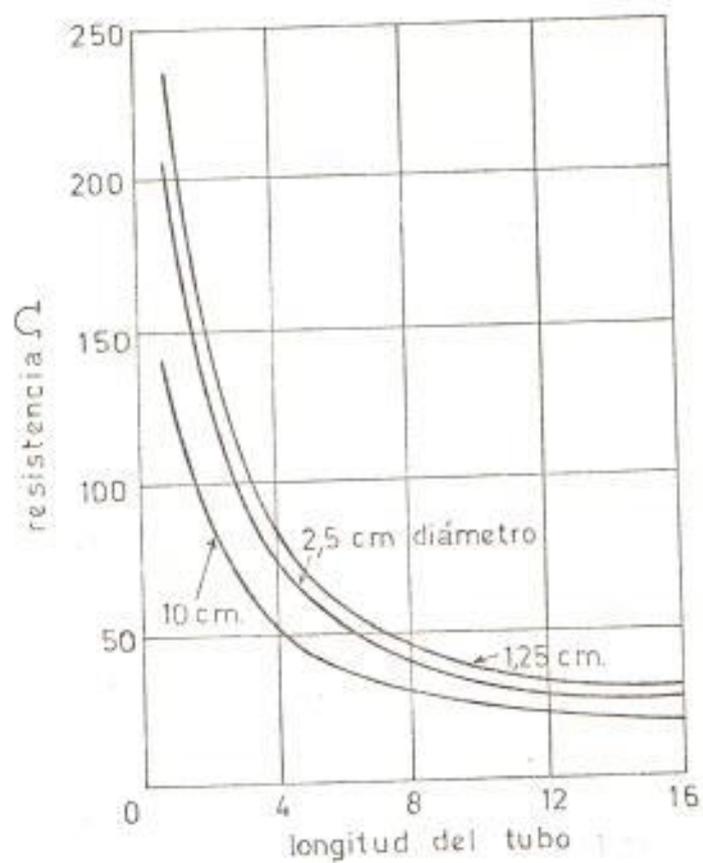


Figura 5



EFFECTO DE LONGITUD DEL ELECTRODO DE TUBO SOBRE LA RESISTENCIA PARA RESISTIVIDAD DE TERRENO DE 10000 OHMS.CM.

Figura 6

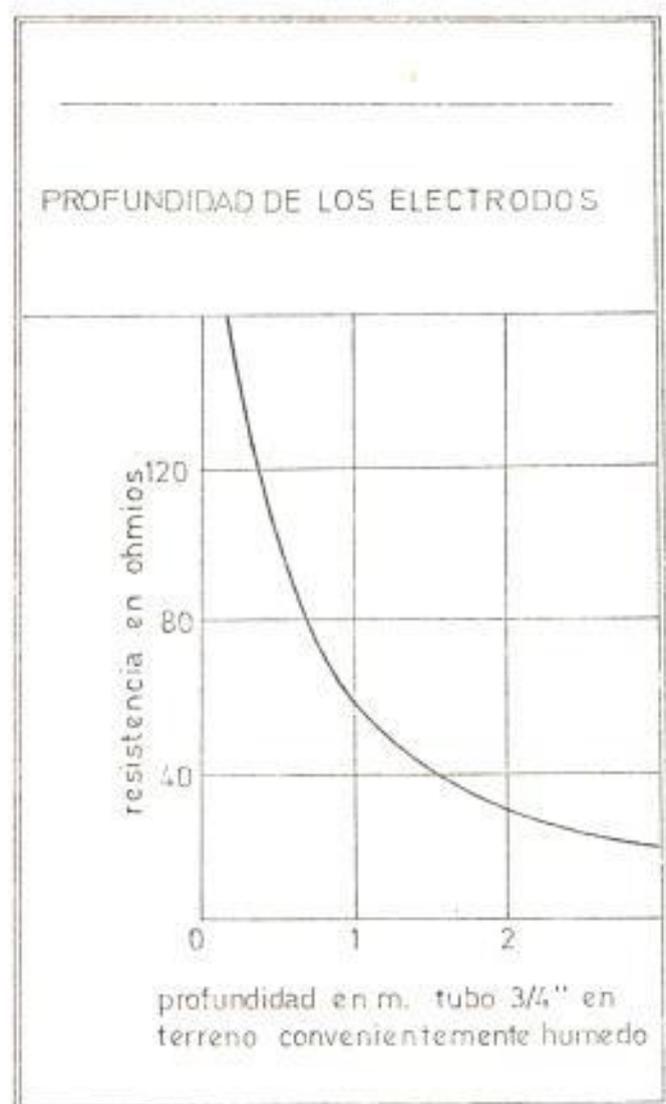


Figura 7

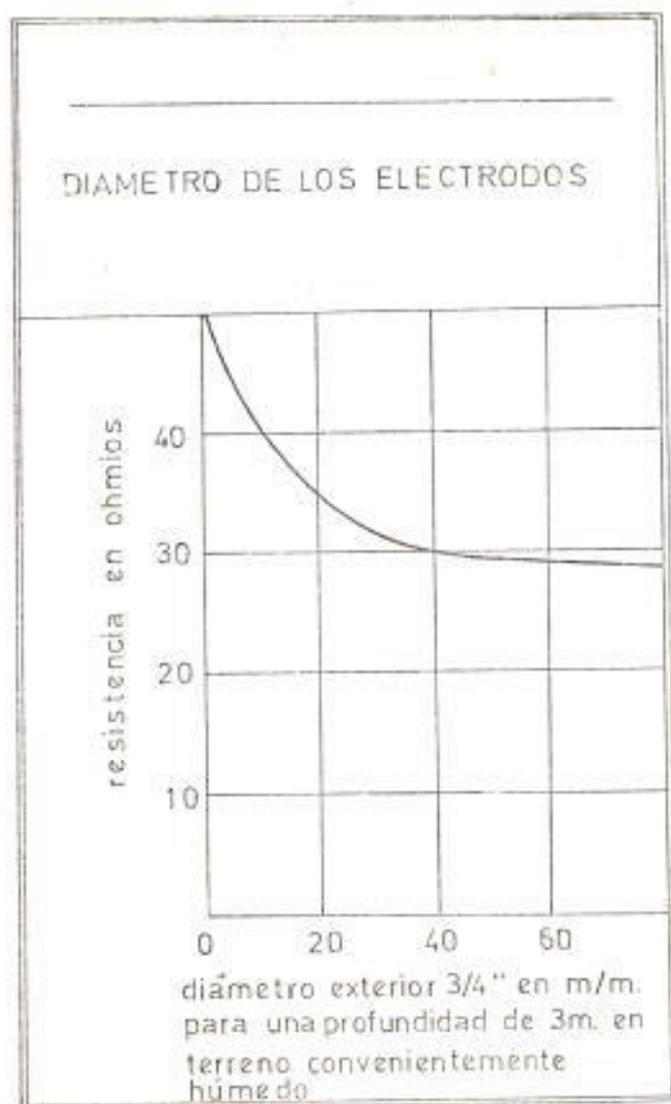


Figura 8

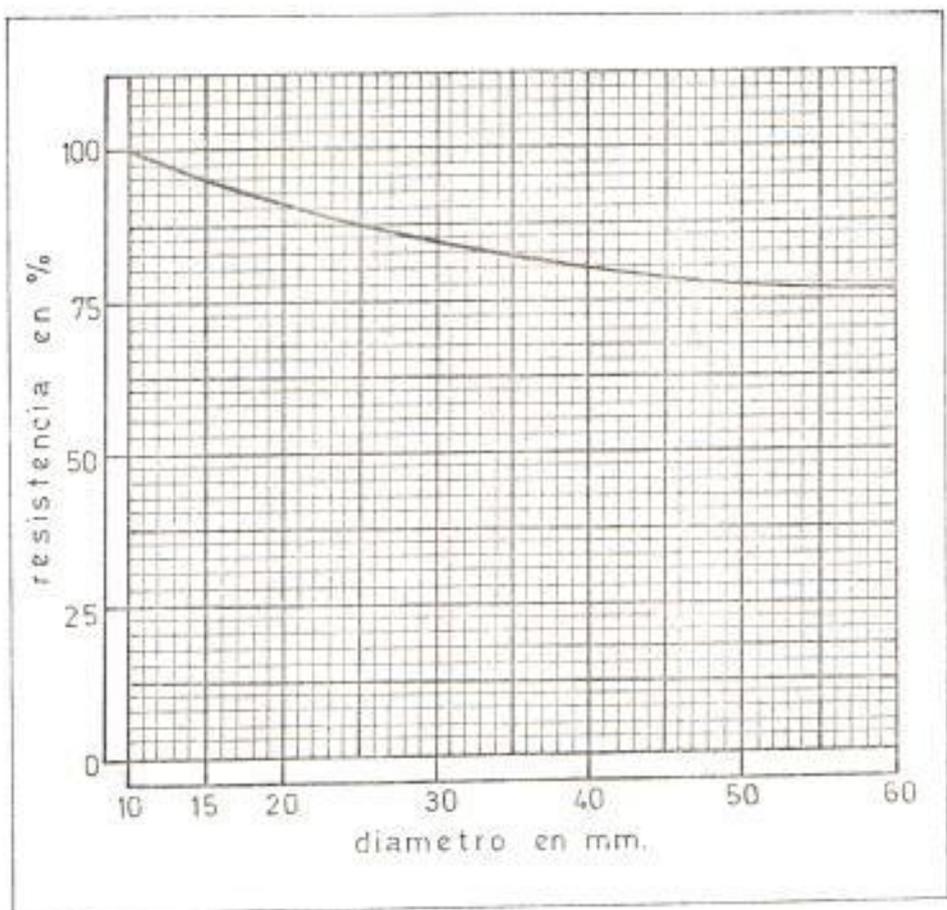


Figura 8a

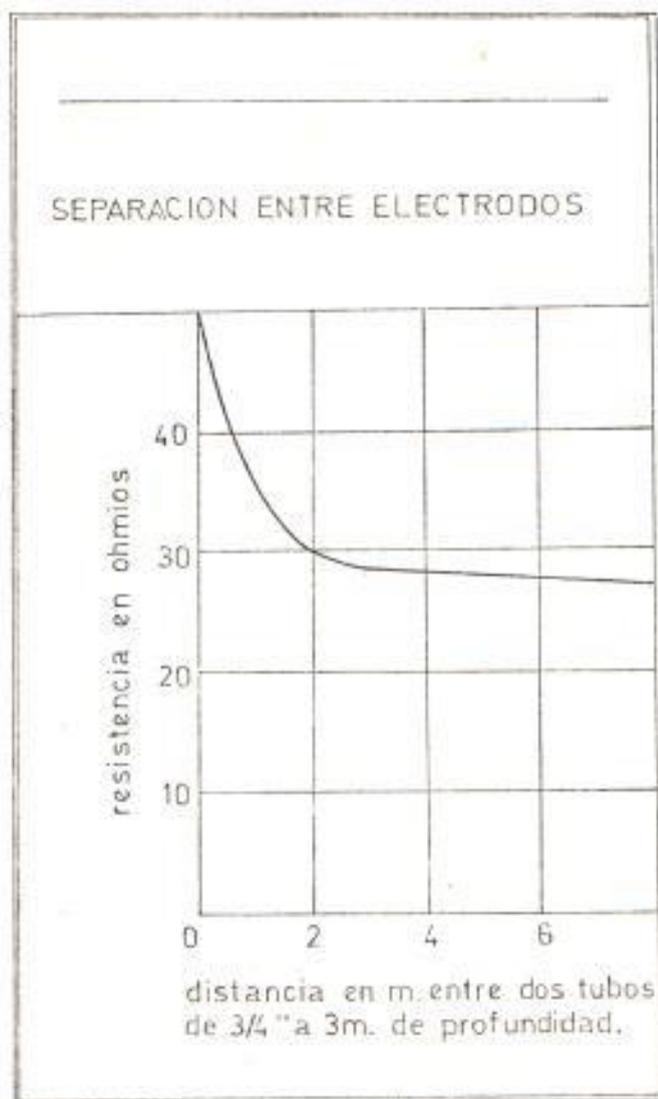


Figura 9

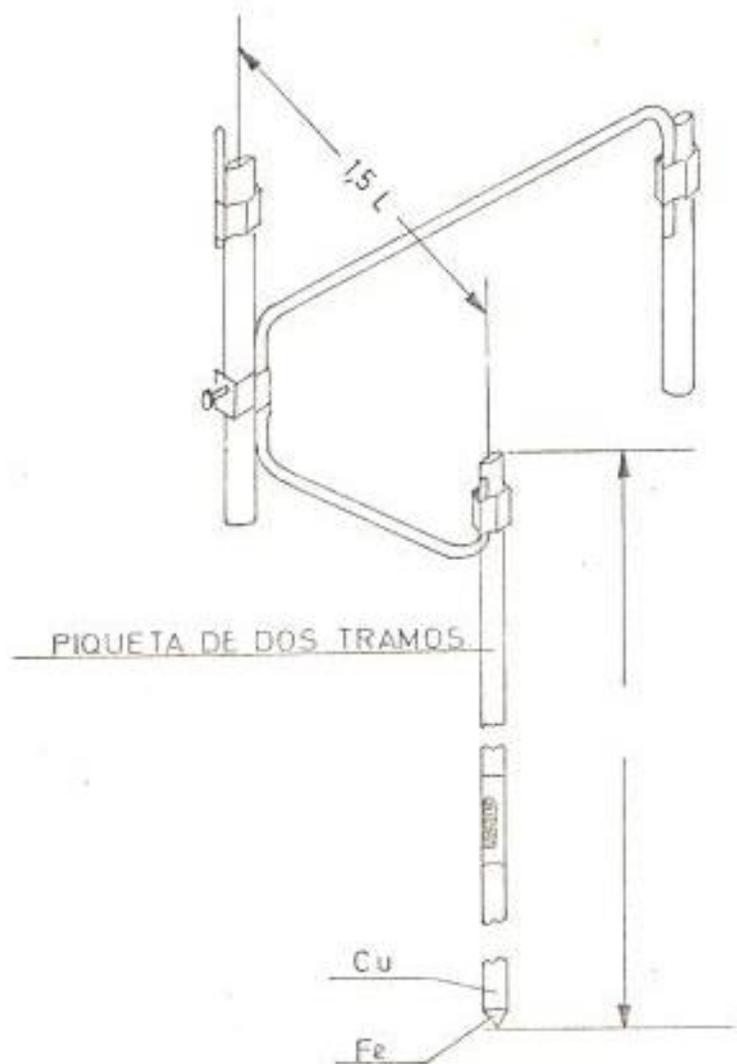


Figura 9a

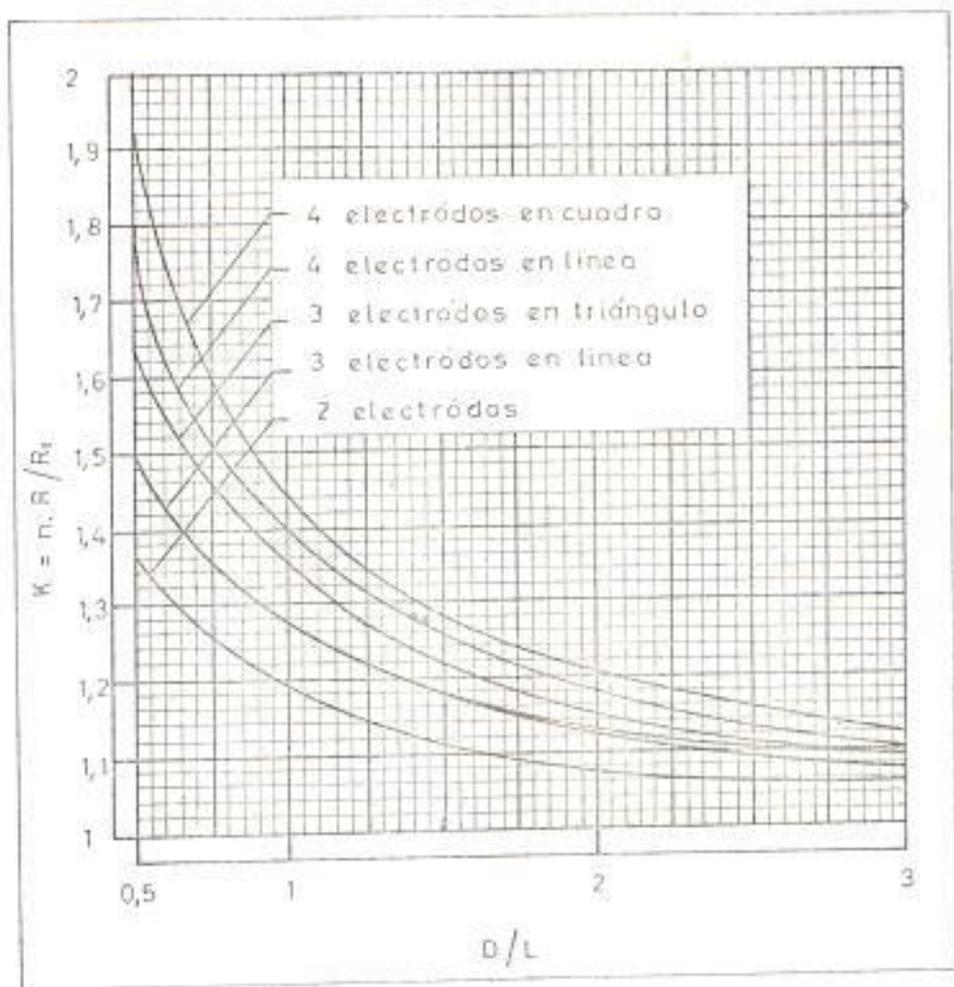
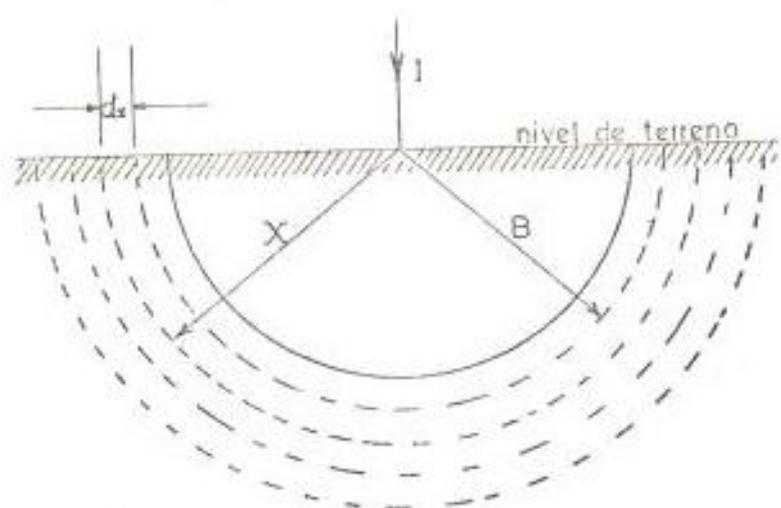
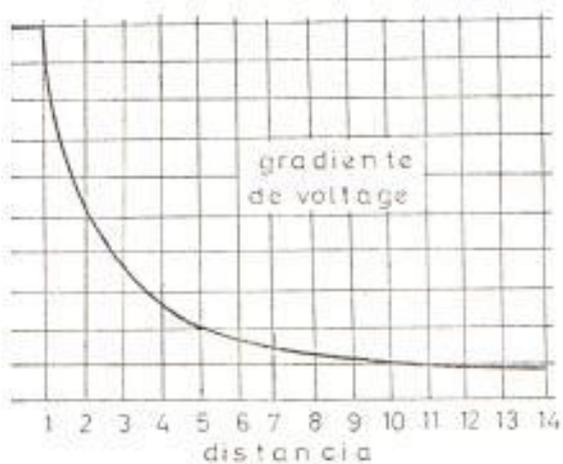


Figura 10

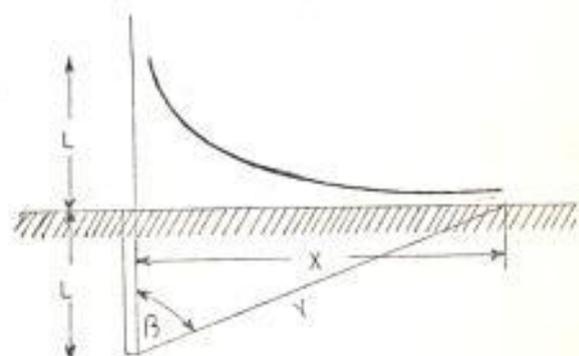


ELECTRODO DE TIERRA SEMIESFÉRICO

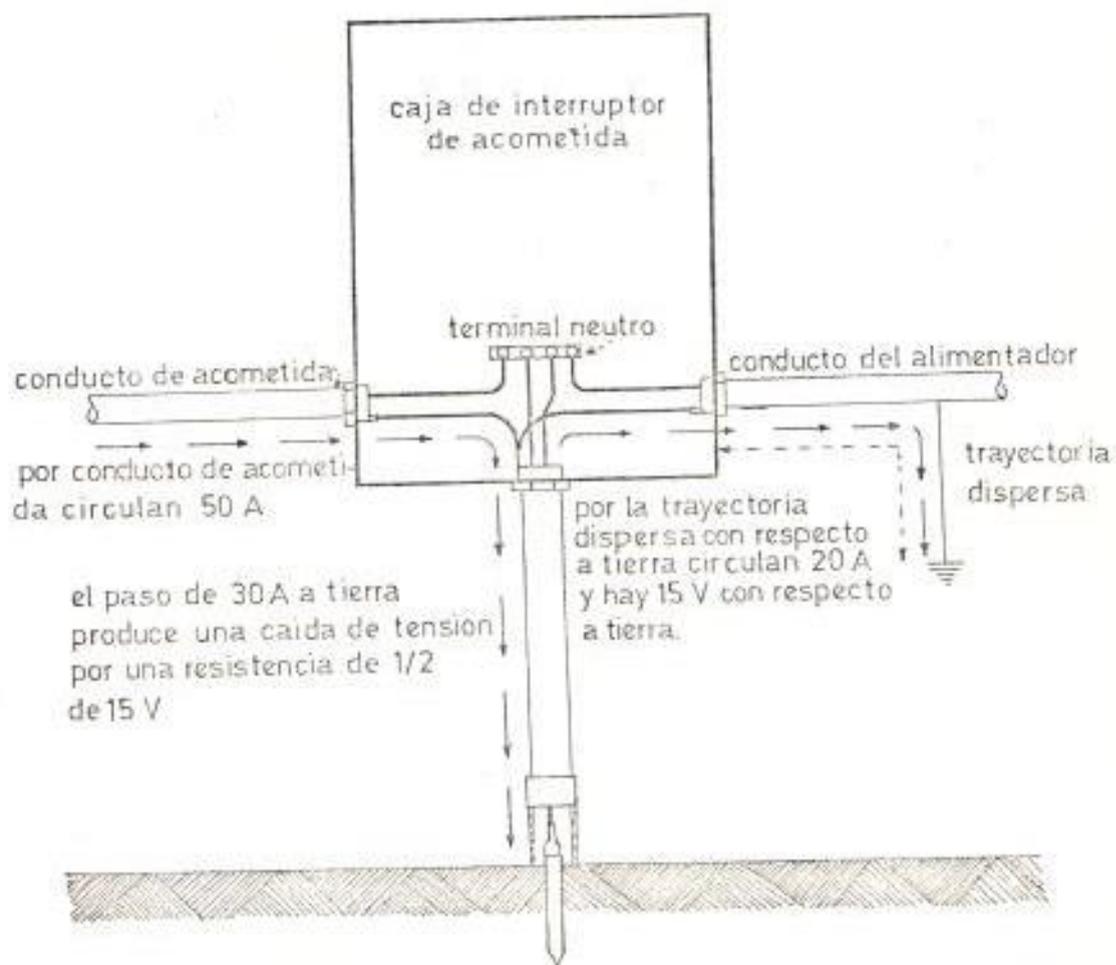
Figura 11



RADIENTE DE VOLTAGE CERCA DEL ELECTRODO

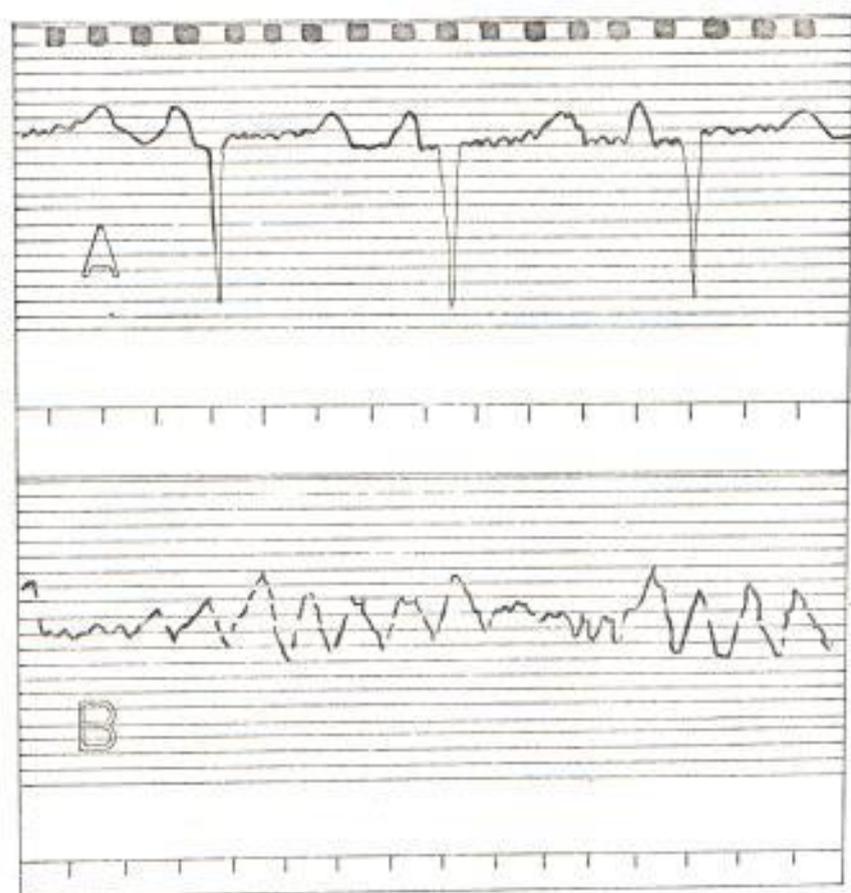


GRADIENTE DE VOLTAGE CERCA DEL ELECTRODO.



ES NO ADMISIBLE DE CORRIENTE A TRAVES DE LOS CONDUCTORES DE TOMA TIERRA: EL POTENCIAL DE LA CAJA DEL INTERRUPTOR SE HA ELEVADO A 15 V SOBRE EL DE TIERRA, HACIENDO CIRCULAR UNA CORRIENTE DESDE LA CAJA A TIERRA A TRAVES DEL CONDUCTO DEL ALIMENTADOR Y UNA TRAYECTORIA DISPERSA

Figura 13



ELECTROCARDIOGRAMA DE UNA OVEJA

- A acción normal del corazón
B fibrilación ventricular

Figura 14

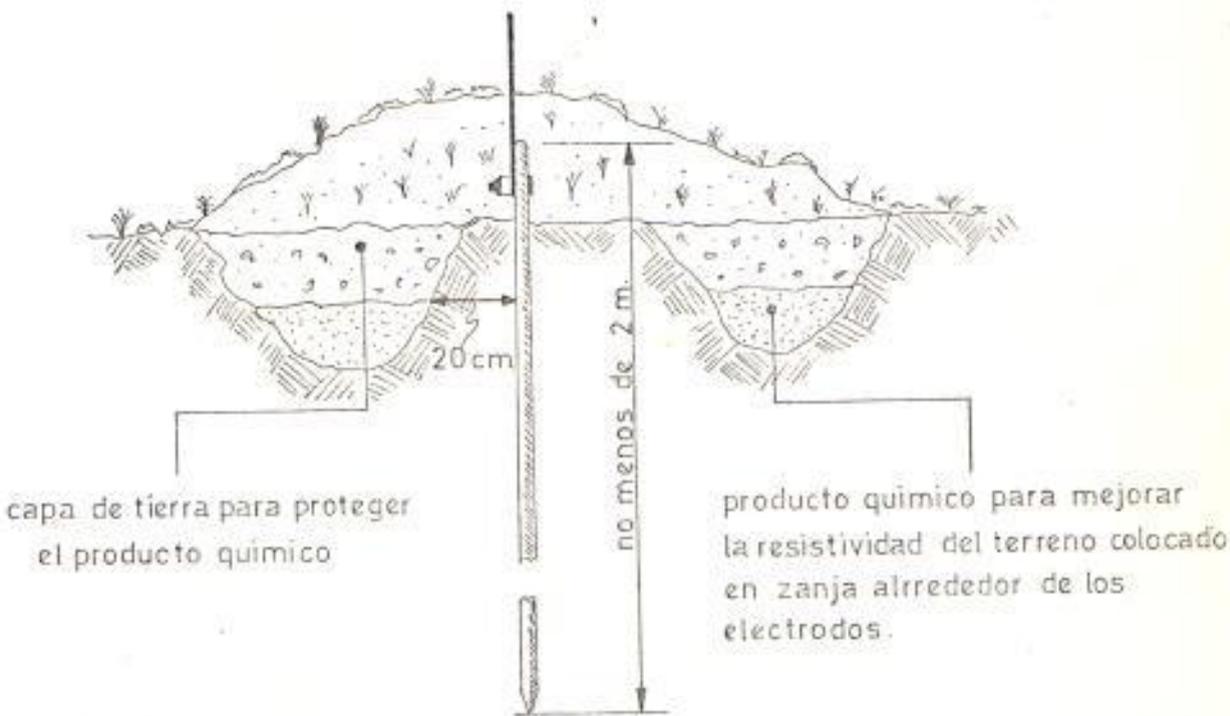
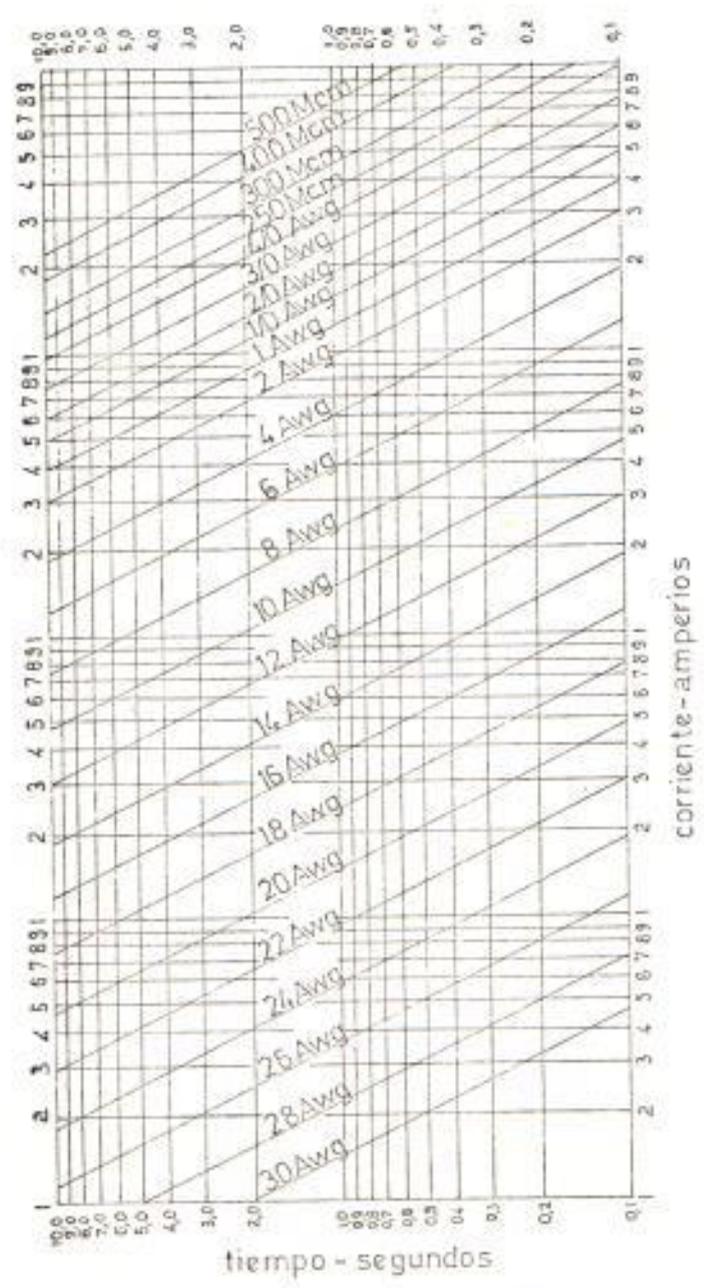
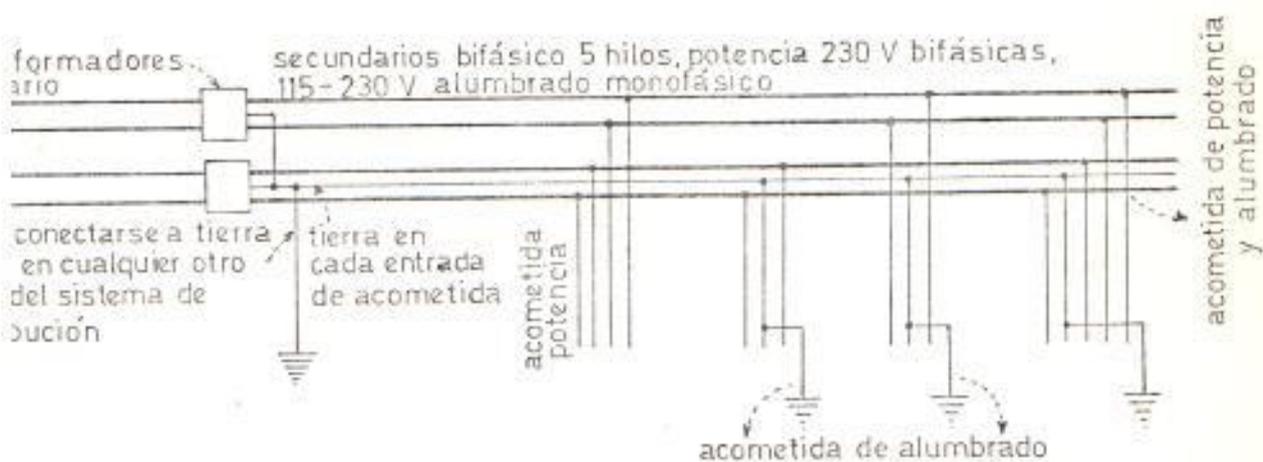


Figura 15



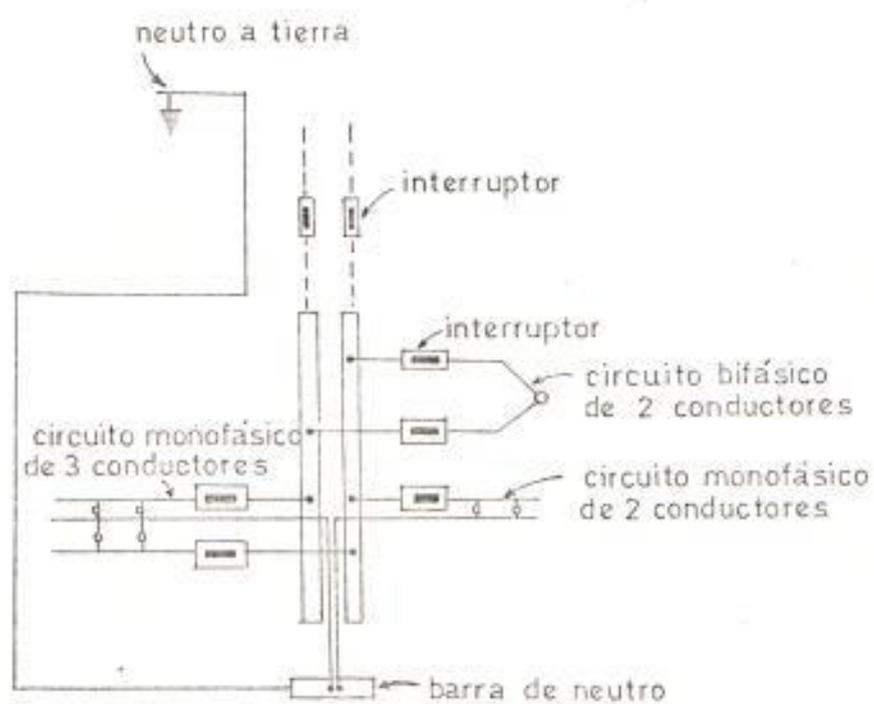
TIEMPO DE FUSION-CORRIENTE PARA CONDUCTORES DE COBRE

Figura 16



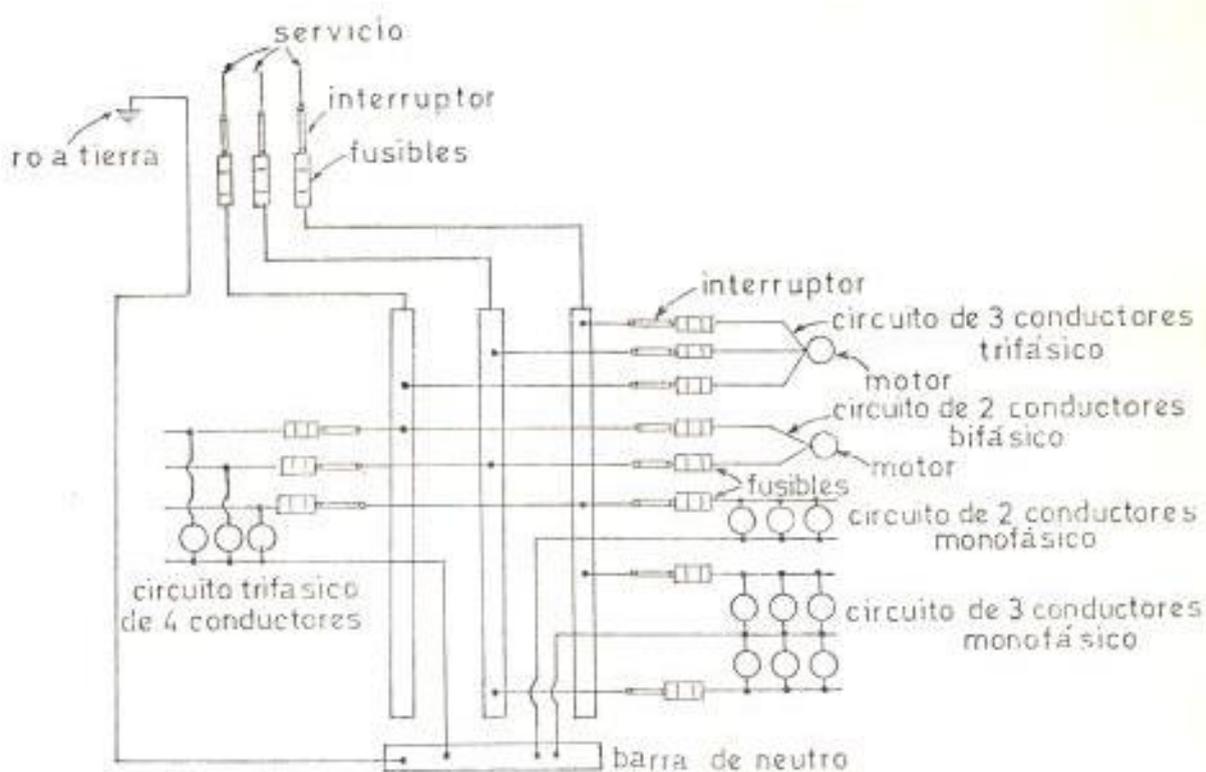
MAS DE DISTRIBUCION SECUNDARIOS BIFASICO DE 5 CONDUCTORES A 115 - 230 V ENERGIA Y ALUMBRADO. EL NEUTRO DEBE SER PUESTO A TIERRA EN CADA ENTRADA Y EN OTROS PUNTOS.

Figura 17



SISTEMA MONOFASICO DE 3 CONDUCTORES

Figura 18



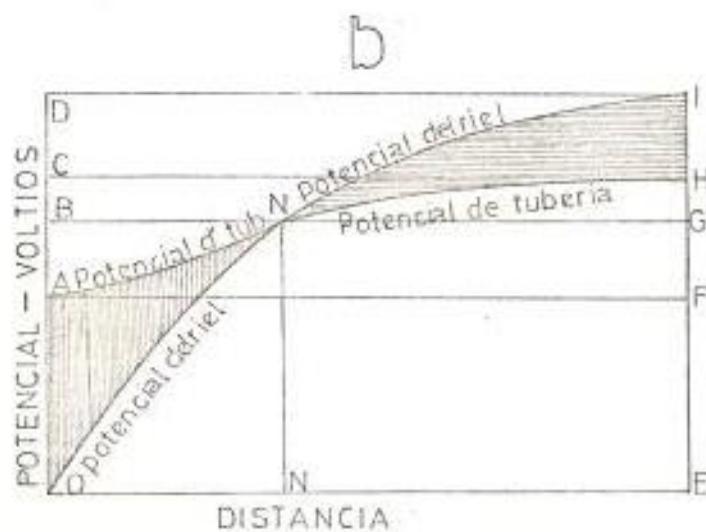
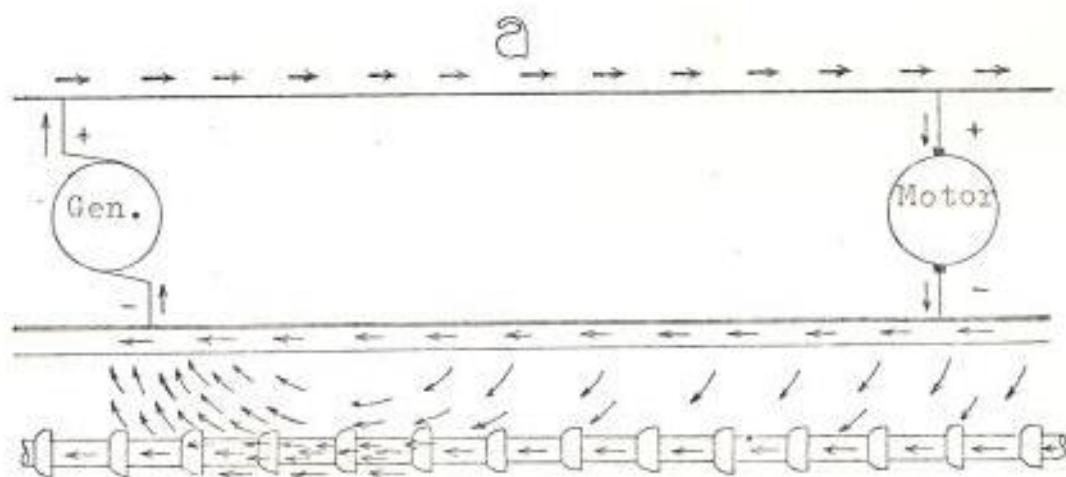
SISTEMA TRIFÁSICO DE 3 CONDUCTORES

Figura 19



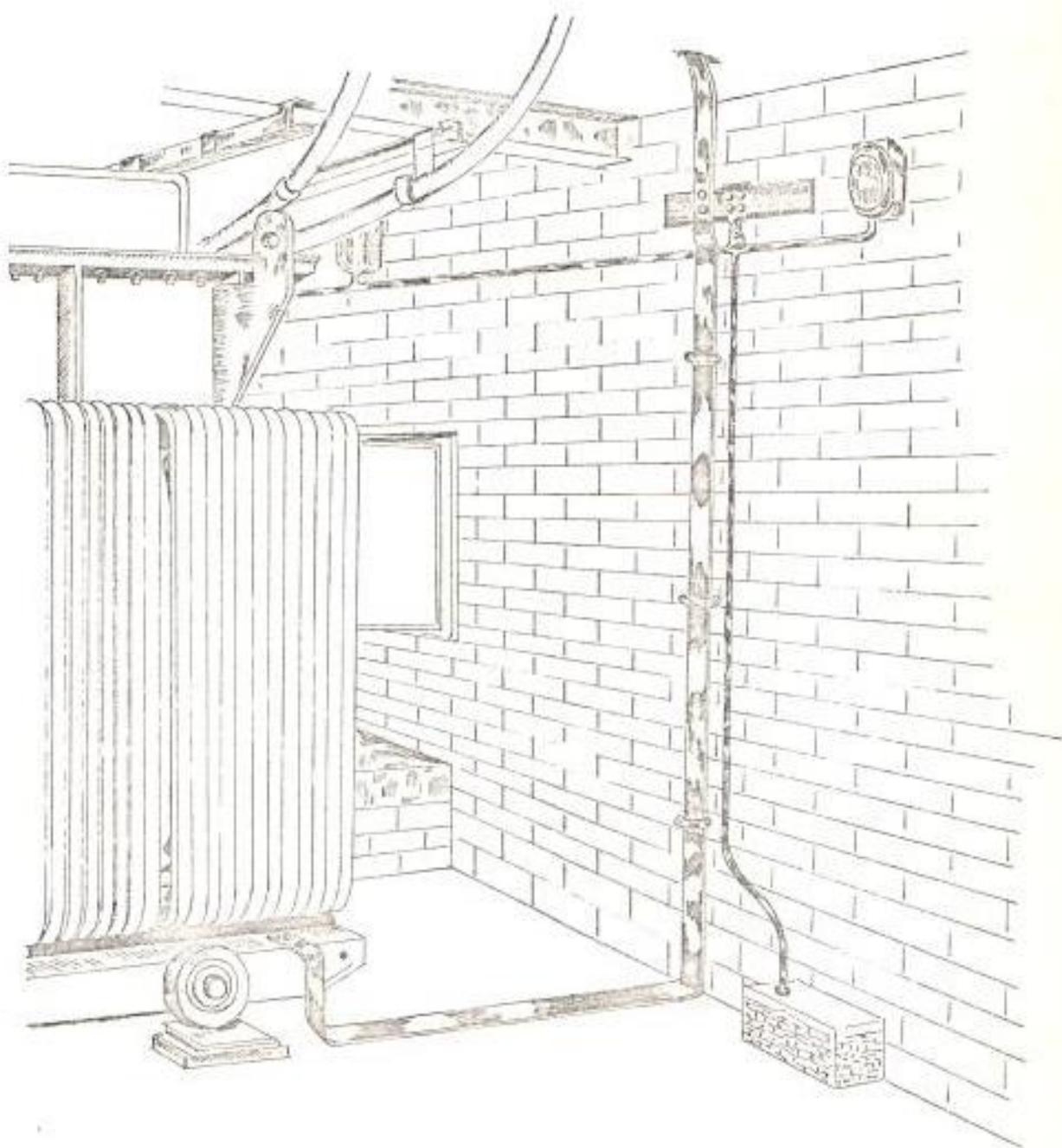
INCA QUE COMPRENDE TRES EDIFICIOS SERVIDOS POR UNA ACOMETIDA UNICA. STAN PERMITIDAS TIERRAS ADICIONALES Y, EN ALGUNOS CASOS, SERAN PRECISAS.

Figura 20



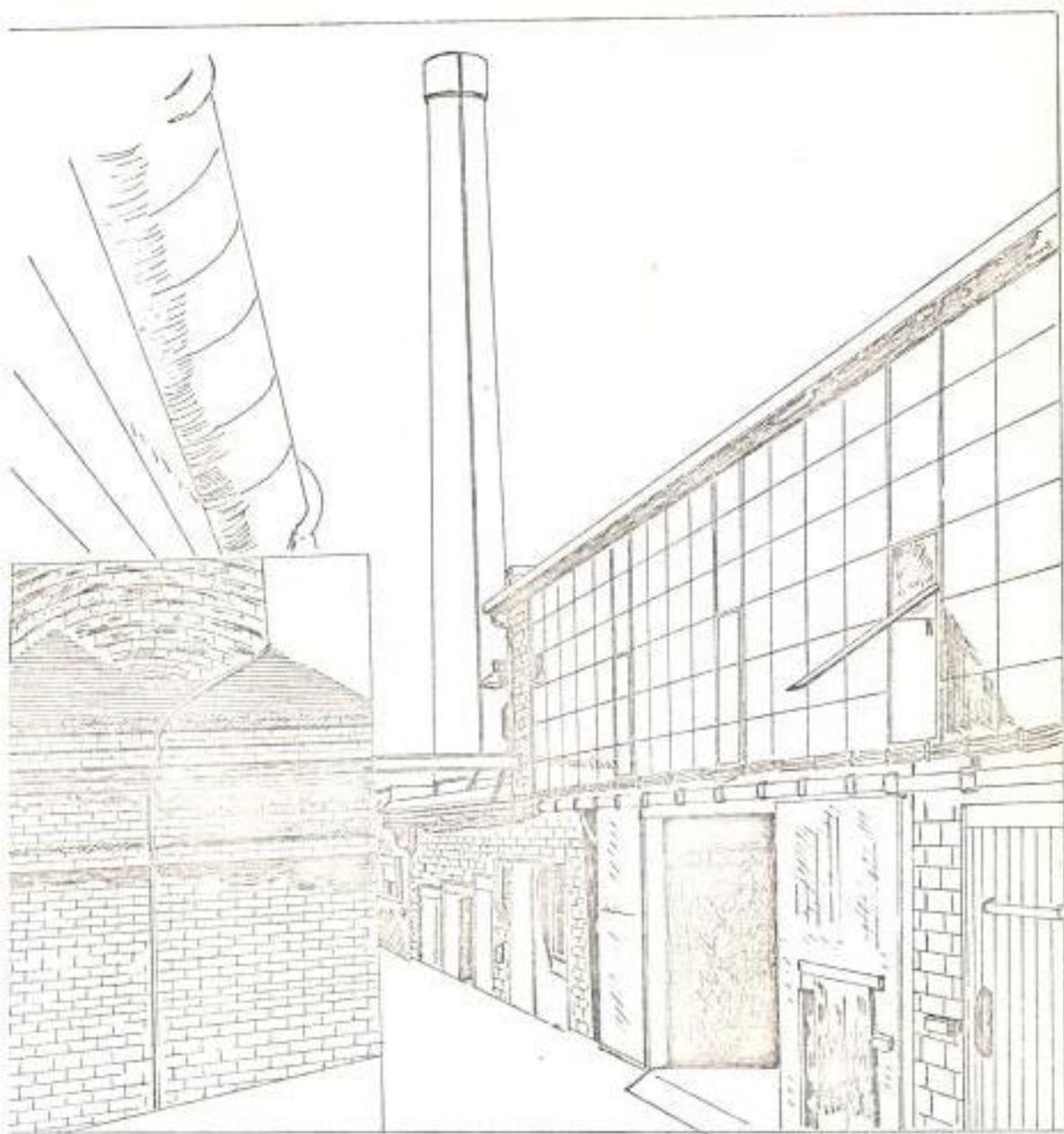
- a CONDICIONES QUE CONTRIBUYEN A LA ELECTROLISIS
 b DISTRIBUCION DE POTENCIALES

Figura 21



CONEXION DE PUESTA A TIERRA DE UNA CAMARA DE TRANSFORMACION

Figura 22



TÍPICA PUESTA A TIERRA PARA UNA ESTRUCTURA ALTA

Figura 23

CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA
PARA LA SUBESTACION GUAYAQUIL DE 450 MVA
230/138 KV

La subestación en consideración está en el sistema de la Interconexión Nacional, y tendrá su ubicación en la parroquia Durán, cerca de la unión de las carreteras que conducen a Durán y Guayaquil, según se muestra en el plano A-1

Los propósitos de estos cálculos son para asegurar un efectivo sistema de puesta a tierra, obteniendo un máximo de seguridad posible. Las consideraciones que tomarán en cuenta son:

- a) Resistividad del suelo
- b) Corrientes de falla
- c) Diseño preliminar
- d) Cálculo del máximo potencial de la malla
- e) Potencial de contacto
- f) Potencial de paso
- g) Especificaciones técnicas de la subestación

a.-RESISTIVIDAD DEL SUELO.

El suelo está constituido por arcilla plástica de tipo expansivo, es uniforme y bajo.

Las medidas de resistividad llevadas a cabo fueron hechas en la época más seca del año. Los resultados de las medidas fueron las siguientes:

La resistividad de tierra fue de 8 ohms.m pero para calcular podemos usar 10 ohms/m. El porcentaje de humedad promedio fue 9,83 % a una temperatura de prueba de 94°C .

La temperatura en la zona de ubicación de la subestación fluctúa de 24°C a 33°C dando un promedio de $28,5^{\circ}\text{C}$.

b.-CORRIENTES DE FALLA.

Para efectos de cálculo hay que considerar la falla de máxima corriente, y en este caso tenemos que son las producidas por la falla de línea a tierra.

Según datos tomados en el Instituto Nacional de Electrificación las corrientes de cortocircuito son:

Barra	Corrientes	KV
B19	4.566 amp.	230
B22	7.783	138

Siendo 7.783 amperios la corriente máxima podemos tomar 8.000 amperios para los calculos.

Debe tenerse en cuenta que la corriente considerada es la máxima corriente de falla de línea a tierra fluyendo al suelo de la subestación y el terreno circunvecino.

c.-DISEÑO PRELIMINAR DE LA MALLA DE TIERRA.

1.-Medida del conductor.

Para determinar la medida del conductor que formará la malla, se utiliza la ecuación:

$$A_c = \frac{I_{sc}}{\sqrt{\log \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1}} \quad \left(\text{Sec 4-212 Archer Knowlton} \right)$$

$\frac{33 t_f}{33 t_f}$

Donde

A_c = área de la sección transversal del conductor en circular mils

I_{sc} = corriente de falla

t_f = tiempo de duración de la falla en segundos.

T_a = temperatura ambiental en $^{\circ}C$

T_m = máxima temperatura posible en las uniones

Ahora tenemos los datos siguientes:

La corriente de falla máxima en la subestación según datos de INECEL es de 8.000 amperios.

El tiempo de falla, desde el inicio hasta su des

conexión consideramos 0,50 segundos, siendo un tiempo bastante considerable el cual nos da un margen de seguridad.

La temperatura máxima posible para que no sufran ninguna clase de deterioro las uniones empernadas de cobre es aproximadamente 250°C.

La temperatura ambiental promedio es de 28.5°C.

Con estos datos reemplazamos en la fórmula anterior para obtener la sección del cable a utilizarse.

$$A_c = \frac{8.000}{\sqrt{\frac{\log \frac{250 - 28,5}{234 - 28,5}}{33 \times 0,5}}} = 180.000 \text{ circular mils}$$

Correspondiendo aproximadamente a un cable 4/0 AWG en cobre.

2.-Preliminares del diseño.

El criterio básico es colocar los conductores en forma paralela y uniformemente espaciado en dirección de la longitud (dimensión más grande) dentro del área de la subestación.

Las interconexiones transversales deberán ser colocadas para conseguir una mejor distribución de la corriente de falla en la malla, para aumentar los pasos de corriente a tierra y para dar mayor

seguridad en el caso de que se rompa alguno. El conductor para la malla, que fué calculado anteriormente, debe colocarse a 50 cm. de profundidad (código eléctrico, sección puesta a tierra). Además debe colocarse electrodos de varillas de 2,60 m. enterrados verticalmente y conectados con pernos en las uniones que forman los conductores de la malla.

Esto se hace con la finalidad de reducir aún más la resistencia de tierra de la malla y aumentar la capacidad de conducción de corriente.

La superficie de todas las subestación debe cubrirse con piedra triturada en una capa de unos 15 centímetros de espesor.

Como un chequeo del diseño preliminar, la longitud total del conductor incluyendo las varillas se compara con el resultado de la ecuación siguiente:

$$L = \frac{\text{Km. Ki. } P. I. \sqrt{t}}{165 + 0,25 P_s}$$

Esta ecuación aproxima la longitud total del conductor requerido para mantener las gradientes de potencial dentro de límites aceptables, como

veremos más adelante.

L = longitud total de los conductores enterrados.

I = corriente máxima

ρ = resistividad promedio del terreno ohm.m

ρ_s = resistividad promedio del terreno en la superficie.

t = duración máxima del cortocircuito

K_i = factor de corrección de irregularidad
($0,65 + 1,72 n$) donde n es igual al número de conductores paralelos en una dirección.

K_m = coeficiente de la malla, definido como

$$\frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots$$

D = espaciamiento entre conductores

h = profundidad de enterrado

d = diámetro de los conductores

Para el caso en estudio tenemos los siguientes datos:

I = 8.000 amperios

ρ = 10 ohm.m

ρ_s = 3.000 ohm.m

t = 0,5 segundos.

$K_i = 0,65 + 0,172 X = 1,51$

$$D = 40 \text{ m}$$

$$d = 0,013 \text{ m}$$

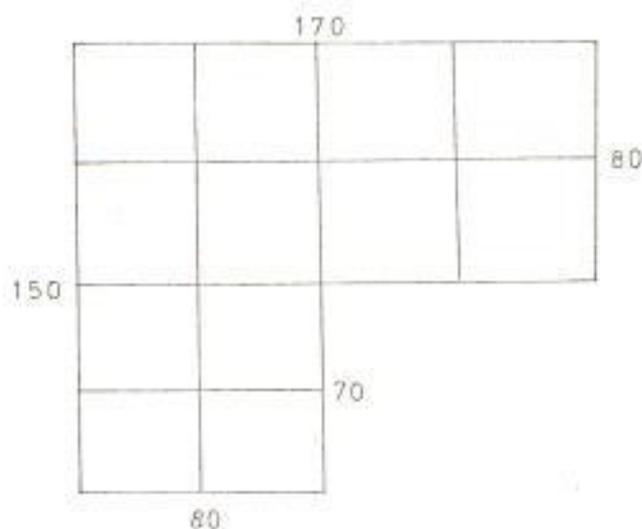
$$h = 0,50 \text{ m}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{40^2}{16 \times 0,5 \times 0,013} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) = 1,382$$

De donde

$$L = \frac{1,382 \times 1,51 \times 10 \times 8.000 \sqrt{0,5}}{165 + (0,25 \times 3.000)} = 128,995 \text{ m}$$

La malla deberá construirse de acuerdo al siguiente diagrama.



La longitud del cable o conductor a emplearse según la figura será:

$$3 \times 170 = 510 \text{ m}$$

$$1 \times 90 = 90 \text{ m}$$

$$2 \times 80 = 160 \text{ m}$$

Tanversales

$$2 \times 80 = 160 \text{ m}$$

$$3 \times 150 = 450 \text{ m}$$

Varillas

$$21 \times 2,00 = 42 \text{ m}$$

Sumando todos estos resultados tenemos una longitud igual a 1322 m. lo cual está dentro del resultado de la fórmula anterior.

3.-Resistencia de la malla.

Luego de diseñada la malla se procede a calcular la resistencia de conexión a tierra del sistema.

Se puede considerar, con mucha aproximación, a toda la malla como equivalente a una superficie conductora circular, con área igual al área cubierta por ella.

Con esta área se encuentra el radio del círculo aplicando la siguiente ecuación (área del círculo).

$$A = \pi r^2$$

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

$$A = 80 \times 170 = 13.600$$

$$80 \times 70 = \frac{5.600}{19.200 \text{ m}^2}$$

Reemplazando

$$r = \sqrt{\frac{19.200}{\pi}} = 78 \text{ m}$$

Con este valor encontramos la resistencia de la malla, usando la fórmula para una plancha circular conductora a tierra.

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

$$\rho = 10 \text{ ohm.m}$$

$$r = 78 \text{ m.}$$

$$L = 1.322 \text{ m.}$$

Reemplazando

$$R = \frac{10}{4 \times 78} + \frac{10}{1.322} = 0,0396 \text{ ohmios}$$

d.-CALCULO DEL MAXIMO POTENCIAL DE LA MALLA

El máximo potencial de la malla respecto a tierra se calcula utilizando la ley de ohm. cuya ecuación es:

$$E = IR$$

E = potencial máximo al que llega la malla respecto a tierra en voltios.

R = resistencia aproximada de la malla a tierra en ohmios.

I = máxima corriente de falla que circulará de la malla a tierra en amperios.

Para este caso:

$$E = 8.000 \times 0,0396 = 316,8 \text{ voltios}$$

Si este potencial encontrado en esta forma no excede de la tensión máxima E_0 que puede soportar una persona sin sufrir daño alguno, el diseño de la red estará correcto.

Empleando la fórmula:

$$E_0 = \frac{165 + 0,25\rho}{\sqrt{t}} \text{ (apuntes de INECEL)}$$

Donde

E_0 = tensión de contacto

ρ = resistividad del terreno en la superficie inmediatamente bajo los pies.

t = máximo tiempo de duración de la descarga.

$$1^{\circ} = 10 \text{ ohm.m.}$$

$$2^{\circ} = 3.000 \text{ ohm.m}$$

$$t = 0,50 \text{ segundos}$$

Reemplazando

Primer caso: sin piedra triturada

$$E_0 = \frac{165 + 0,25 \times 10}{\sqrt{0,5}} = 236,91$$

Segundo caso: con la capa de piedra triturada

$$E_o = \frac{165 + 0,25 \times 3.000}{\sqrt{0,5}} = 1.300$$

Llamemos K a la relación entre E y E_o , el cual debe ser menor que la unidad para que los voltajes sean tolerables.

$$K_1 = \frac{316,8}{236,91} = 1,33$$

$$K_2 = \frac{316,8}{1.300} = 0,24$$

K_2 tiene una relación menor a la unidad por lo tanto esta dentro de lo aceptable.

e.-POTENCIAL DE CONTACTO.

El potencial de contacto se refiere al potencial de la malla cuando;

- 1.-La persona está dentro del perímetro de la malla y se pone en contacto con algún objeto o estructura puesta a tierra a través de la malla.

En este caso tenemos:

$$E_{\text{malla}} = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I}{L}$$

$$k_m = 1,38$$

$$k_1 = 1.51$$

$$\rho = 10 \text{ ohm.m}$$

$$I = 8.000 \text{ amperios}$$

$$L = 1.322 \text{ metros}$$

Entonces

$$E_{\text{malla}} = 126,09$$

Ahora

$$K_1 = \frac{126,09}{236,91} = 0,53$$

$$K_2 = \frac{126,09}{1300} = 0,096$$

Los cuales son aceptables para el K_2

f.-POTENCIAL DE PASO

El potencial de paso E_s es la diferencia de potencial entre dos puntos a 0,80 metros, distancia que equivale al paso normal de un hombre. El valor tolerable es definido por la ecuación

$$E_s = \frac{165 + \rho}{\sqrt{t}}$$

Reemplazando

$$E_s = \frac{165 + 3.000}{\sqrt{0,5}} = 4.476,66 \text{ voltios}$$

$$E_s = \frac{165 + 10}{\sqrt{0,5}} = 247,52 \text{ voltios}$$

Ahora se calcula el potencial de paso de la malla el cual viene dado por la ecuación.

$$E_s = \frac{K_s \times K_l \times \rho \times l}{L}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} + \frac{1}{5D} + \frac{1}{6D} \right)$$

Este factor asume que D, h, d.

Reemplazando

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \times 0,5} + \frac{1}{20 + 0,5} + \frac{1}{2 \times 20} + \frac{1}{3 \times 20} + \frac{1}{4 \times 20} + \frac{1}{5 \times 20} + \frac{1}{6 \times 20} \right)$$

$$K_s = \frac{1,119}{\pi} = 0,356$$

$$E_s = \frac{0,356 \times 1,51 \times 10 \times 8.000}{1322} = 32,53 \text{ voltios}$$

Luego vemos la razón r la cual debe ser menor que la unidad.

$$r_1 = \frac{32,53}{247,52} = 0,13 \text{ (10 ohm.m)}$$

$$r_2 = \frac{32,53}{4476,66} = 0,0074 \text{ (3.000 ohm.m)}$$

5.-ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LA SUBESTACION

- 1.-El piso del área de la subestación debe tener una capa de piedra triturada del tipo chispa de por lo menos de 15 cm de espesor.

- 2.-La cerca de la subestación debe estar puesta a tierra a través de la malla.

- 3.-La cerca debe estar dentro del área de la malla y por lo menos al metro del conductor periférico.

- 4.-En las esquinas debe aumentarse la capacidad de la malla, poniendo en los cuadros de las esquinas conductores interconectados.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Código Eléctrico Nacional American Standard.
- 2.- Fundamentos de Instalaciones Eléctricas de media y alta tensión, Gilberto Enriquez Harper.
- 3.- Código Eléctrico Nacional de Seguridad: Reglas de Conexión a Tierra y Partes I, II, III, IV, y V (Centro de Productividad de Monterrey y Bureau of Labor, Washington D.C.)
- 4.- Standard Handbook for Electrical Engineers, Archer E. Knowlton.
- 5.- Estaciones Transformadoras y de distribución, Gaudencio Zoppetti.
- 6.- Protección de las Instalaciones Domésticas e Industriales, J. A. Crabtree & Co.
- 7.- Teoría del Campo Electromagnético en Ejercicios y Problemas, V.A. Govorkov y S.D. Kupalian
- 8.- Material de Puesta a Tierra, Información Técnica
- 9.- Disposiciones Sobre Puestas a Tierra y Puentes de Unión en Instalaciones en Areas Peligrosas, Normas Venezolanas. Forven 552-71
- 10.- Earthing Equipment, Publicación 70.1 Octubre 1965 de British Insulated Callenden's Cables Limited.
- 11.- Cálculo de Sistemas de Tierra, información Técnica de Inceel
- 12.- Safety Rules for the Installation and Maintenance of Electric Supply and Communication Lines.

- 13.- Electrical code for one-and two family dwellings
excerted from the 1968 national electrical code
- 14.- Técnica de la alta tensión.- ROTH
- 15.- Earthing principles and practice by R.W. Ryder
- 16.- Earthing.- British Standard code of practice. 1965



A.F. 141975