



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMAS DE INSTALACION DE TIERRAS

TESIS PROFESIONAL

que para obtener el grado de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a :

MARCO ANTONIO TAPIA ABARCA

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

SISTEMAS DE TIERRAS.

INDICE	PAGINA
<i>Introducción.</i>	
TEMA I. GENERALIDADES.	
I.1.- <i>Objetivos.</i>	1
I.2.- <i>El shock eléctrico.</i>	2
I.3.- <i>La descarga atmosférica directa de una estructura.</i>	4
I.4.- <i>Problema básico de una conexión a tierra.</i>	7
TEMA II. INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE EN LA CONEXION A TIERRA.	
II.1.- <i>Introducción.</i>	11
II.2.- <i>Efecto del suelo sobre la resistencia a tierra.</i>	12
II.3.- <i>Efecto de la temperatura.</i>	14
II.4.- <i>Efecto de la humedad en el terreno.</i>	16
II.5.- <i>Ventajas de la profundidad de la varilla.</i>	18
TEMA III. CONEXION A TIERRA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION AEREA.	
III.1.- <i>Corrientes de fibrilación.</i>	20
III.2.- <i>Tomas de tierra para los pararrayos o descargadores.</i>	22
III.3.- <i>Tipos de conexión a tierra en los transformadores.</i>	23
III.4.- <i>Conexión a tierra de línea área.</i>	26
TEMA IV. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO.	
IV.1.- <i>Introducción</i>	28
IV.2.- <i>Criterios de diseño.</i>	29
IV.3.- <i>Parámetros de diseño.</i>	34
TEMA V. MEDICIONES DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.	
V.1.- <i>Introducción.</i>	36
V.2.- <i>Objetivos de la medición de la resistividad del suelo.</i>	38
V.3.- <i>Métodos de medición.</i>	39
V.4.- <i>Recomendaciones prácticas para realizar las mediciones.</i>	43
TEMA VI. MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO.	
VI.1.- <i>Introducción.</i>	44
VI.2.- <i>Objetivos de la medición de la resistencia a tierra.</i>	45
VI.3.- <i>Métodos de medición.</i>	46
TEMA VII. INSTRUMENTOS PARA REALIZAR LAS MEDICIONES.	
VII.1.- <i>Megger de balance nulo.</i>	51
VII.2.- <i>Megger de lectura directa.</i>	53

TEMA VIII. DISEÑO PRELIMINAR DE LA CONEXION A TIERRA.	PAGINA
VIII.1.- Introducción.	55
VIII.2.- Datos para el diseño.	56
VIII.3.- Procedimiento tradicional para el cálculo de la resistencia de la conexión a tierra.	59

INTRODUCCION.

Cuando ocurren disturbios atmosféricos y sobrevoltajes en las instalaciones eléctricas, es de vital importancia tener conexiones a tierra de baja resistencia, para restablecer las condiciones normales de operación.

Al tener conexiones de resistencia a tierra muy bajas, el restablecimiento normal de la línea es muy rápido.

Estas conexiones, aunadas a los dispositivos propios de protección, aseguran una continuidad de servicio, los daños a los equipos son mínimos y los más importantes, proveen una gran seguridad al personal.

De aquí, la necesidad de realizar una reducción en los métodos tradicionales de diseño de las redes de tierra, que con expresiones simplificadas presentan grandes limitaciones para lograr este objetivo, se realiza un análisis de las condiciones y criterios básicos para el diseño de una red de tierra, se presentan recomendaciones para realizar las mediciones de resistencia del electrodo de puesta a tierra y resistividad del suelo, se propone una metodología para la elaboración de diseños preliminares.

TEMA I. GENERALIDADES.

I.1.- Objetivos.

- I.1.1.- Es de vital importancia conocer los límites de seguridad que deben de existir cuando se presentan las elevaciones de potencial en alguna estructura o torre de transmisión, entre los distintos puntos con los que el cuerpo humano o algún ser vivo pueden hacer contacto; al presentarse alguna falla en la línea de transmisión causada usualmente por descarga atmosférica y presentar en base a estos límites una guía para el diseño práctico de un sistema de tierras.
- I.1.2.- Establecer los límites de confiabilidad de la línea de transmisión, en relación al valor de la conexión a tierra de las estructuras.
- I.1.3.- Desarrollar los métodos matemáticos que ayudarán a resolver los problemas típicos de elevaciones de potencial.
- I.1.4.- Analizar, en base a las experiencias de construcción la manera práctica y los cuidados que se deben tener al realizar las mediciones de campo.

I.2.- El shock eléctrico.

Los efectos causados por el paso de la corriente eléctrica en el cuerpo humano, resaltan importantemente los objetivos indicados, estos efectos son principalmente consecuencias de la magnitud de la corriente y de la duración del shock.

Aplicando la Ley de Ohm, la magnitud de la corriente es:

$$I = \frac{E}{Z} \text{ donde:}$$

E, es la tensión aplicada entre dos puntos del cuerpo.

Z, es la impedancia total entre esos dos puntos y no sólo la del cuerpo humano.

Por lo tanto, a frecuencias bajas la impedancia del cuerpo es esencialmente resistiva, mientras que a altas frecuencias se vuelve no lineal y presenta las características de un circuito resistivo - capacitivo.

Al aplicar directamente a la piel humana tensiones de 240 volts o más, se presenta la perforación y deja frecuentemente bien localizada una quemadura profunda. En estos casos la impedancia del cuerpo es el principal factor que limita la intensidad de la corriente que circula.

La resistencia del cuerpo se comporta linealmente a 100 HZ pero, se ha demostrado que la impedancia se reduce a menos del 50% con un aumento de la frecuencia de 50 a 50,000 HZ.

Para las frecuencias normales usadas en los sistemas de potencia de 50 a 60 HZ, la resistencia de la piel humana la forma principalmente la capa callosa de la epidermis que varía en las diversas partes del cuerpo y marcadamente entre los individuos.

Cuando la piel está seca, puede tener una resistencia de 100,000 a 300,000 OHMS/mm²; para la piel húmeda se pueden reducir estos valores hasta al 1%.

La piel sudorosa reduce fuertemente la resistencia de la capa superior y por lo tanto, durante el trabajo a temperaturas altas del ambiente adicionadas a humedad alta, los individuos quedan más expuestos a daños por corrientes de magnitudes inferiores.

Las condiciones fisiológicas y psicológicas, tienen también -- gran influencia sobre la resistividad de la piel, y estos factores adquieren importancia cuando una corriente intensa circula durante más de uno o dos segundos y al resistir la corriente -- por más de unos segundos, se forman ampollas que reducen aún -- más la resistencia.

Los contactos sobre una piel lastimada por una cortadura o en una abrasión, pueden ser muy dolorosos con corrientes de sólo unos cuantos miliamperes.

Se acepta en general, un valor de 500 ohms como resistencia mínima entre dos extremidades mayores del cuerpo humano, y se -- usa un valor de 1,000 ohms para representar el circuito entre -- las manos a sudor normal de una persona, para estimar los niveles de reacción a la corriente.

1.3.- La descarga atmosférica directa a una estructura.

Para dar una idea básica y general de la distribución de la onda de sobrevoltaje en el hilo de guarda, la estructura o torre y el suelo que esta en contacto con ésta última, se muestra la Fig. I.1, en la cual se considera que un rayo cae en la parte más alta de la torre.

En el análisis de este planteamiento, no se toman en cuenta, las reflexiones y refracciones que sufren las ondas al estar viajando en el hilo de guarda y la torre, atenuaciones, distorsiones, tipo y forma de estas corrientes, inducidas en el conductor de fase por el voltaje a través de la cadena de aisladores.

Así que cuando el rayo cae sobre la parte más alta de la torre, se considera que una onda de corriente de valor I_g es inyectada a un sistema compuesto por hilo de guarda-torre - pie de torre (terreno en contacto con la base de la torre). Una porción de esta onda viaja a lo largo de cada hilo de guarda y -- una componente similar I_t viaja hacia la base de la torre.

Donde:

I_g , es la corriente de rayo.

I_r , es la corriente en los hilos de guarda.

I_t , es la corriente en la torre o estructura.

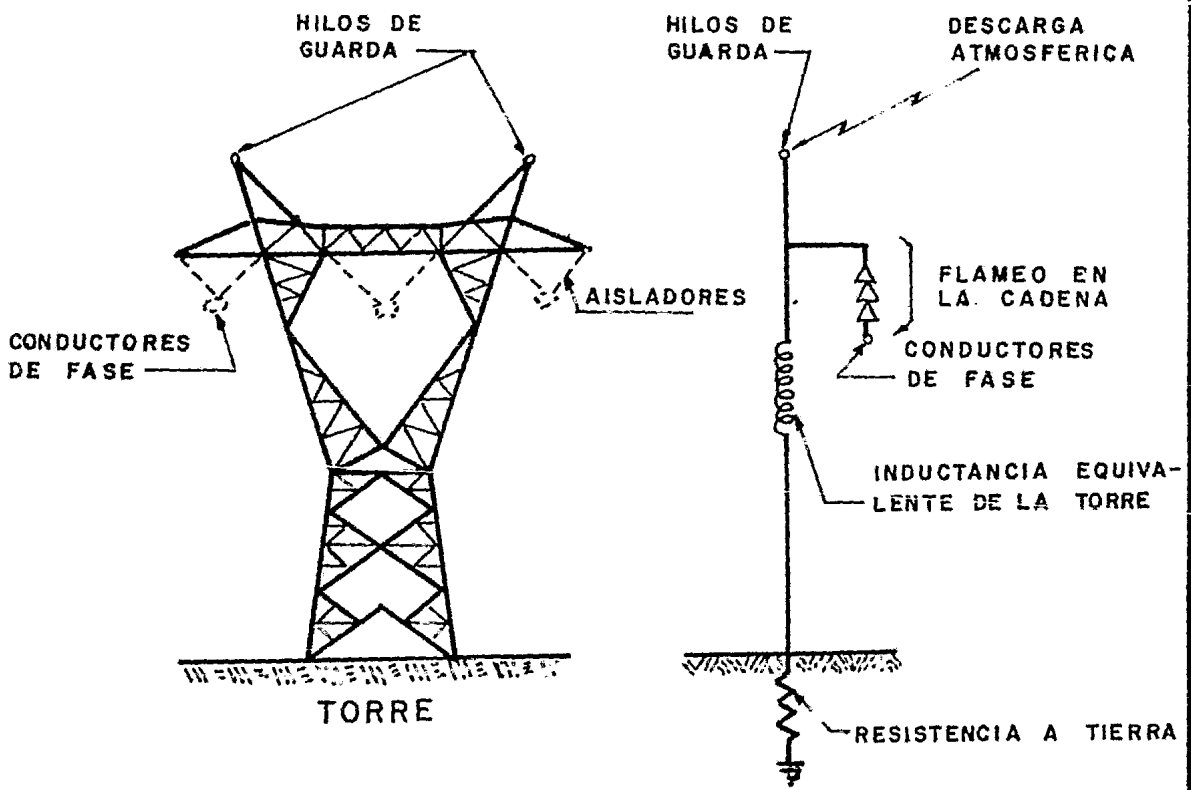


FIG. 1.1.- FALLA DE LINEA A TIERRA POR DESCARGA ATMOSFERICA

DIAGRAMA ELECTRICO DE LA FIG. No. I.1

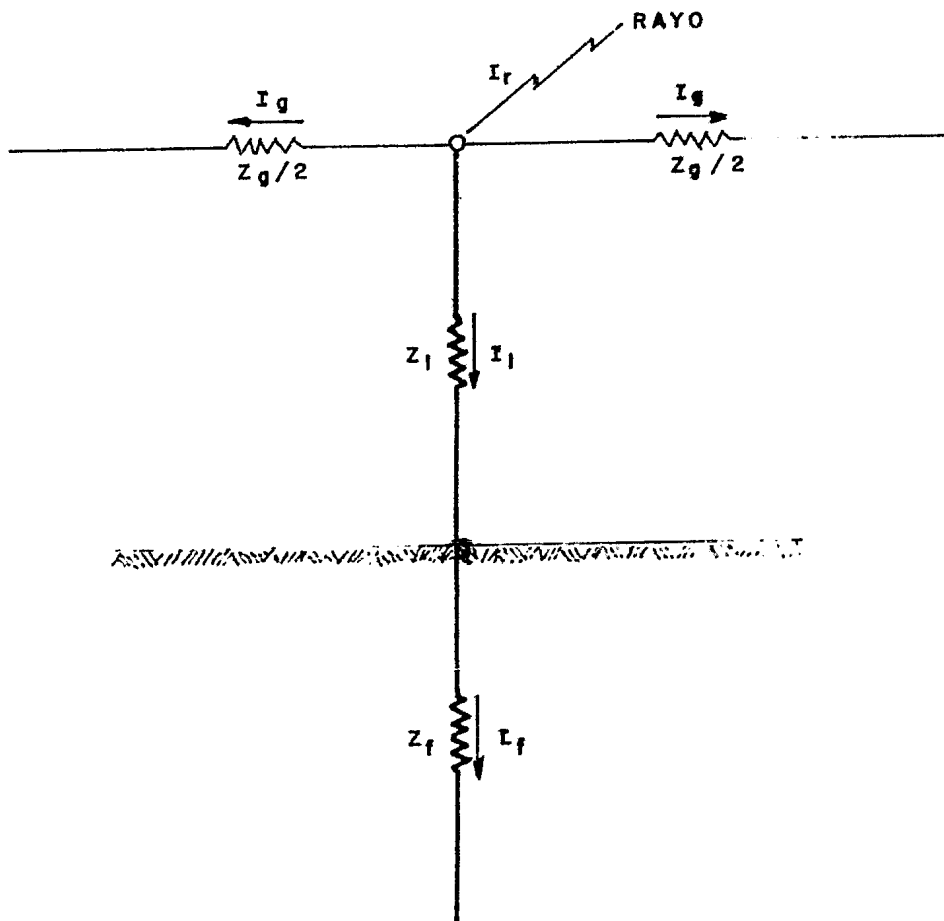


FIGURA I.2

1.4.- Problema básico de una conexión a tierra.

Al presentarse una falla en la línea de transmisión por descarga atmosférica, el flujo de la corriente a tierra a través de las estructuras, producen elevaciones de tensión como se mencionó.

La resistencia que ofrece la tierra al paso de la corriente, eleva el potencial eléctrico de la cimentación de la estructura y la conexión a tierra, que puede resultar tan grande en condiciones adversas, que pueda poner en peligro a quien se encuentre en esa zona comprendida.

La idea generalizada que puede ser tocado todo objeto conectado a tierra, es falsa, ya que debido a la gran resistividad eléctrica de la tierra, todas las corrientes que fluyen por ella producen una caída de tensión considerable y por lo tanto, se hace necesario romper el concepto de que el potencial de la tierra es siempre cero.

El costo de un sistema adecuado de aterrizamiento, es bajo, comparado con el beneficio que representa, aunque el costo en sí parezca alto.

Conciente de que la conexión a tierra queda enterrada y previendo un descuido durante su vida probable, se deberá estipular una conexión a tierra suficientemente resistente, eléctrica, mecánica y químicamente, para una duración estimada de 20 a 30 años.

Cuando incide una descarga atmosférica directa en el hilo de guarda, la corriente del rayo viaja por éste, hacia abajo de la torre a través de la resistencia al pie de la torre a tierra apareciendo un voltaje transitorio a través de la cadena de aisladores.

En caso de presentarse una descarga atmosférica de gran magnitud, teniéndose una impedancia de la torre y una resistencia a pie de torre elevadas, se crea un voltaje transitorio muy grande, que puede rebasar el nivel básico de aislamiento para el que fué diseñada la cadena de aisladores, produciendo así un flameo en dicha cadena.

En la Tabla (1) se puede observar el valor aceptable de conexión de la resistencia a tierra de una torre de transmisión, considerando cierto valor de corriente de inyección y voltaje de flameo de aislamiento.

Así que tratándose de una línea de transmisión de 400 KV. y considerando un nivel básico de aislamiento al impulso del rayo de 1425 KV, se selecciona un valor de resistencia a tierra de 15 -- ohms.

Para una línea de 230 KV - 8.9 OHMS

Para una línea de 85 KV - 4 - 20 OHMS

Este valor de resistencia a tierra se trata de conservar o disminuir y así, lograr obtener, aunado a otros factores el número de salidas de la línea por descargas atmosféricas propuesto.

Además reduciendo el valor de la resistencia a tierra, se incrementa el nivel de protección de corriente máxima de rayo permisible, incrementando ésto la utilidad de la cadena de aisladores, como se muestra en la Tabla (2).

Flameo de aislamiento (KV)	Resistencia a pie de torre (OHMS)
500	5
1000	10
1500	15
2000	20

TABLA NO. 1

Resist. a pie de torre (OHMS)	Corr. máxima de rayo permisible.	Voltaje en la cadena de aisladores (transitorio)
100	28 KA	2.8 MV
20	80 KA	1.6 MV
5	126 KA	6.4 MV

TABLA NO. 2

Los problemas típicos de diseño son:

- a).- Tierra de alta resistividad.
- b).- Elevaciones de potencial en la superficie de la tierra muy altas.
- c).- Mantenimiento difícil de la instalación por estar enterrada.
- d).- La aplicación de modelos de aterrizamiento de estructuras bien fundamentado.
- e).- Aplicar modelos de aterrizamiento arbitrariamente, que no funcionan correctamente bajo ciertas condiciones y para diferentes zonas.

TEMA II. INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE EN LA CONEXION A TIERRA.

II.- Introducción.

Algunas variaciones de la resistencia de una varilla enterrada para el aterrizamiento de las torres son las siguientes:

- a).- La conductancia de suelos, especialmente subsuelos, es un factor importante en la resistencia de un electrodo - y ésta puede variar a través de un rango amplio.*
- b).- Se revisarán varios factores que afectan la conductancia del suelo, o la resistencia de una puesta a tierra, ya que constituyen los principios básicos para hacer el con tacto eléctrico a la tierra.*

II.2.- Efecto del suelo sobre la resistencia a tierra.

No se puede considerar que todas las conexiones a tierra tienen la misma característica, ya que la conductancia eléctrica del suelo se determina por los ingredientes químicos y la cantidad de humedad que contiene.

La Fig. (II.1), muestra que la resistencia de una conexión a tierra depende principalmente del tipo de terreno que rodea al electrodo.

Las celdas cilíndricas de la tierra que rodean al electrodo - tienen el mismo espesor incrementando la distancia del electrodo, éstas celdas tienen una área mayor y por lo tanto, una resistencia más baja - considerando un terreno de resistividad - uniforme, la resistencia más alta se encuentra en la celda inmediata que rodea al electrodo, la cual tiene la sección transversal más pequeña del terreno para flujo a través del suelo.

Cada celda sucesiva incrementa su sección transversal y con esto reduce su resistencia a una distancia aproximada de 2.40 mts. a 3.00 mts. de la varilla, el área de la curva es tan grande que la resistencia de las celdas sucesivas es también despreciable, comparada con la que rodea inmediatamente al electrodo.

De aquí, se establece que la resistencia varía inversamente a la sección transversal y a una distancia pequeña del electrodo donde las curvas de conducción son pequeñas; también la resistividad del terreno es un factor importante.

TABLA DE VALORES MEDIOS.

Resistividad media del terreno.

Tipo de terreno	Resistividad en OHMS - M
Tierra orgánica mojada	10
Tierra húmeda	100
Tierra seca	1000
Roca sólida	10000

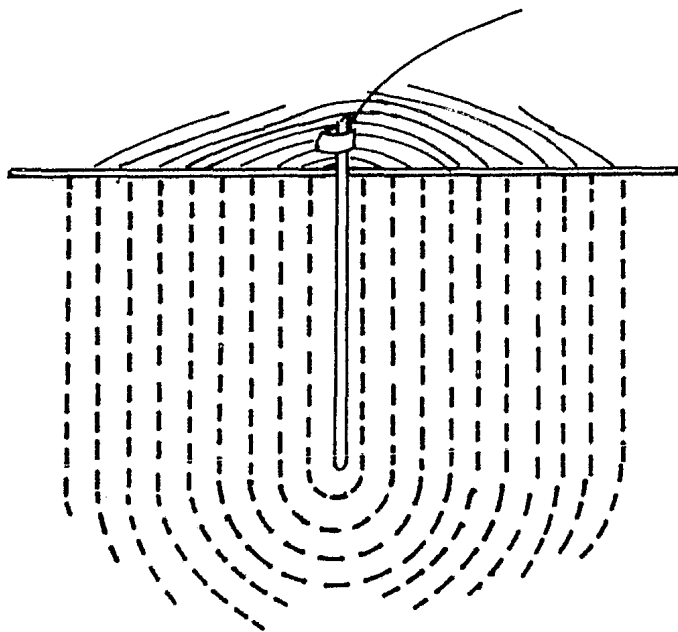


FIG. No. II - I

11.3.- Efecto de la temperatura.

La Fig. (11.2), muestra las variaciones en la resistividad -- del terreno con la temperatura para suelo de arcilla roja con un contenido de humedad de 18.6%.

Este es un factor importante en lugares donde las temporadas de invierno son muy severas y las heladas de la tierra alcanzan una considerable profundidad debajo de la superficie.

Vemos en la figura que abajo de 32°F, la resistividad se incrementa y por lo tanto, la resistencia de la conexión a tierra también se incrementa. De donde, a menor temperatura en el suelo, la resistividad es más alta.

Efecto de la temperatura en la resistencia del terreno.

(Barro arenoso con 15.2% de humedad).

Temperatura °C	°F	Resistividad (OHMS - CM ³).
20	68	7200
10	50	9900
0 (agua)	32	13800
0 (hielo)	32	30000
-5	23	79000
-10	14	330000

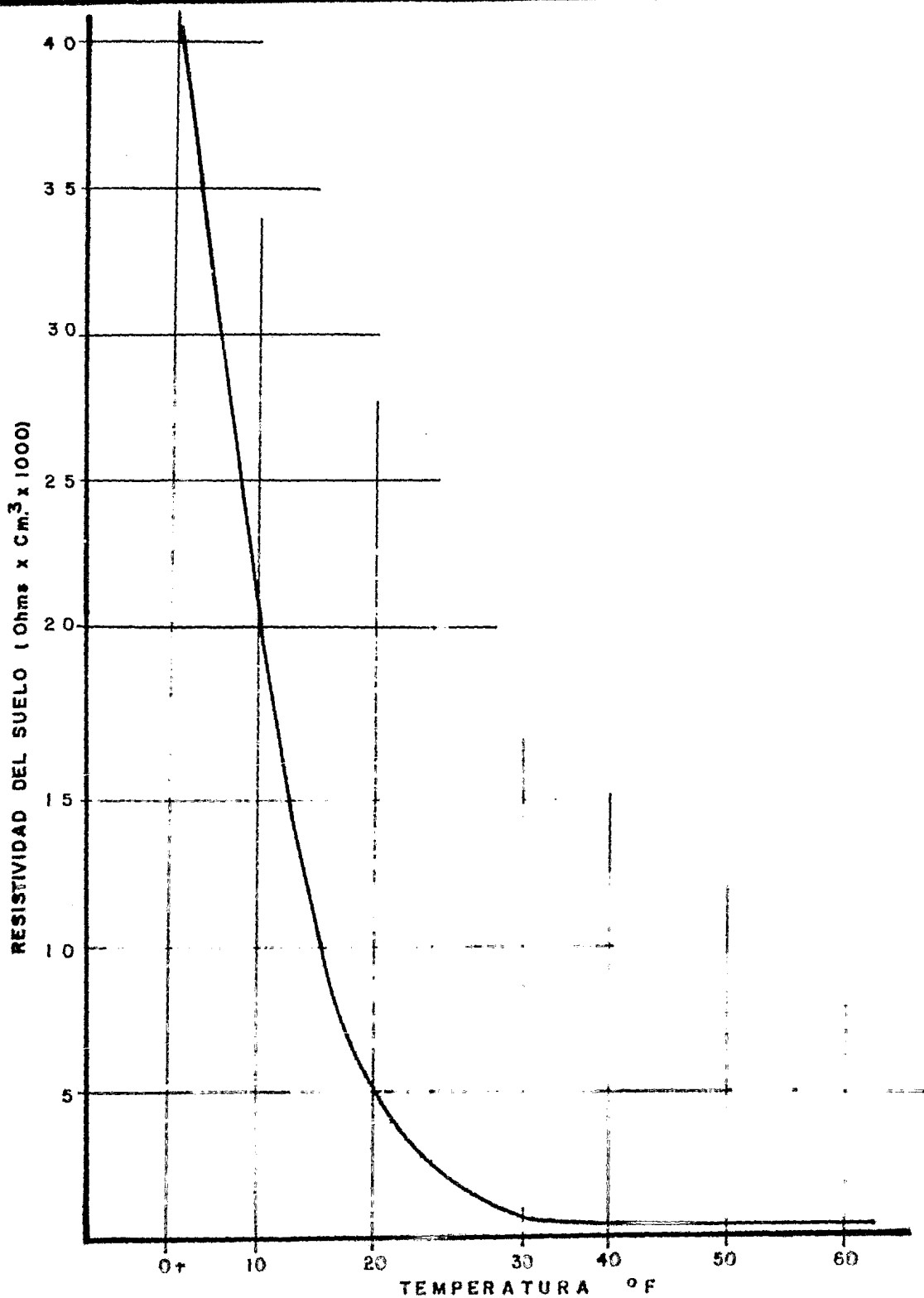
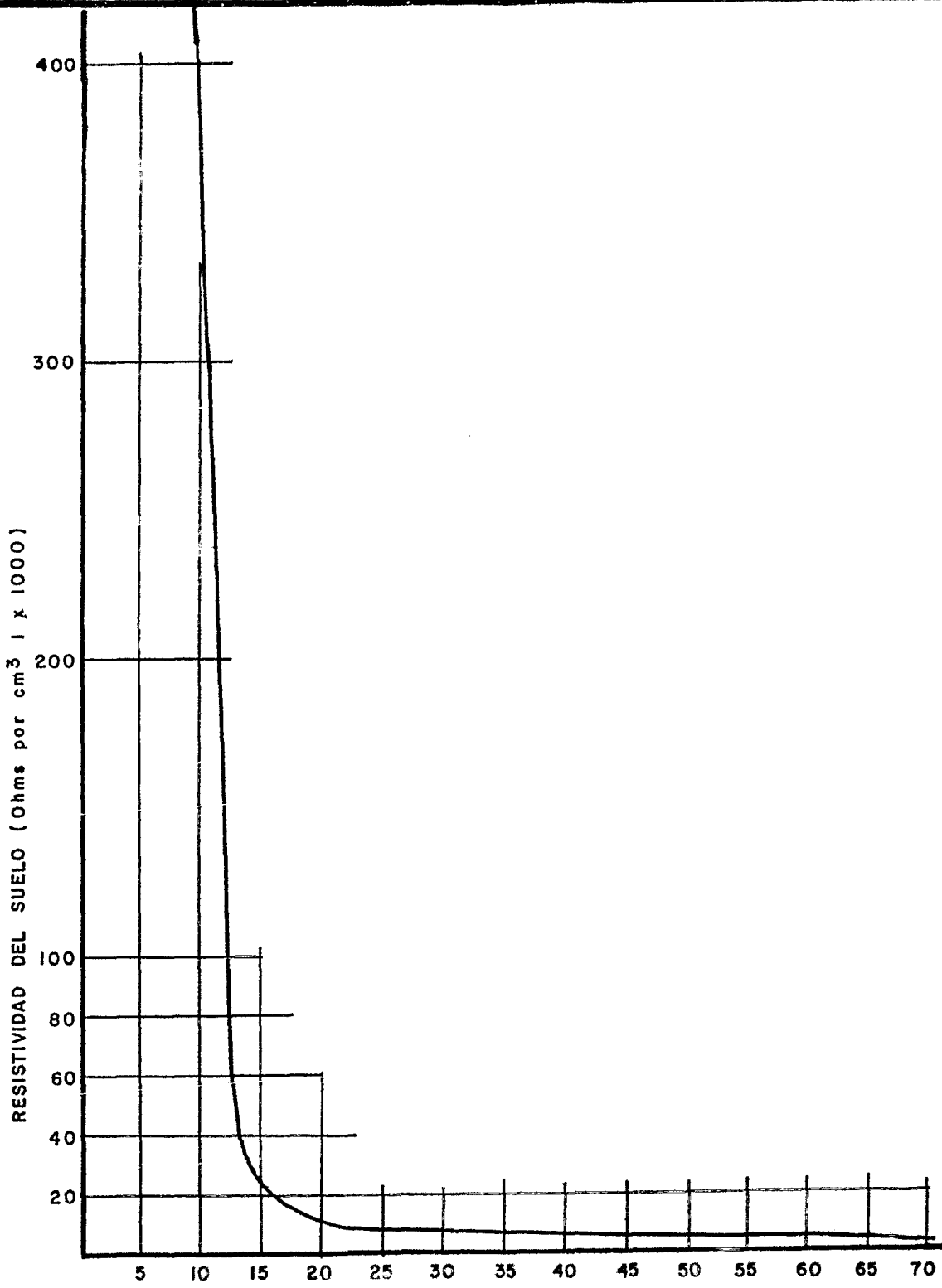


FIG. No II-2
 VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO CON TEMPERATURA

II.4.- Efecto de la humedad en el terreno.

La cantidad de humedad que contiene el terreno es de gran importancia, una pequeña variación del por ciento de humedad -- hace una marcada diferencia en la efectividad de una conexión a tierra hecha con electrodos de un tamaño dado.

En la (Fig. II.3), se muestran las variaciones hechas con arcilla roja, se pueden ver con un contenido de humedad del 10%, -- la resistividad se incrementa mucho más para el mismo terreno, comparado con un contenido de humedad del 20%. Así la resistividad se incrementa rápidamente en el contenido de humedad.



PORCIENTO DE HUMEDAD DEL SUELO
 FIG. II-3

II.5.- Ventajas de la profundidad de la varilla.

La profundidad del electrodo a tierra es un factor importante en la función eléctrica, los electrodos enterrados deben ser lo suficientemente largos para alcanzar el nivel permanente de la humedad del terreno.

El suelo es a menudo, de resistividad uniforme a través de las diferentes profundidades, usualmente los primeros centímetros - cerca de la superficie, tienen relativamente resistencia alta - y están sujetos a cambios de mojado y secado por las lluvias, - las capas más profundas son más estables y menos sujetas a tales fluctuaciones como lo muestra la Fig. (II.4).

Un cambio muy pequeño en la resistencia resultará de el uso de electrodos con diámetros grandes, principalmente el terreno que rodea al electrodo y no el diámetro determina la resistencia, - una regla es; seleccionar un buen diámetro tal de una varilla - que sea resistente para enterrarse en un suelo sin que sufra -- deformaciones u otros daños.

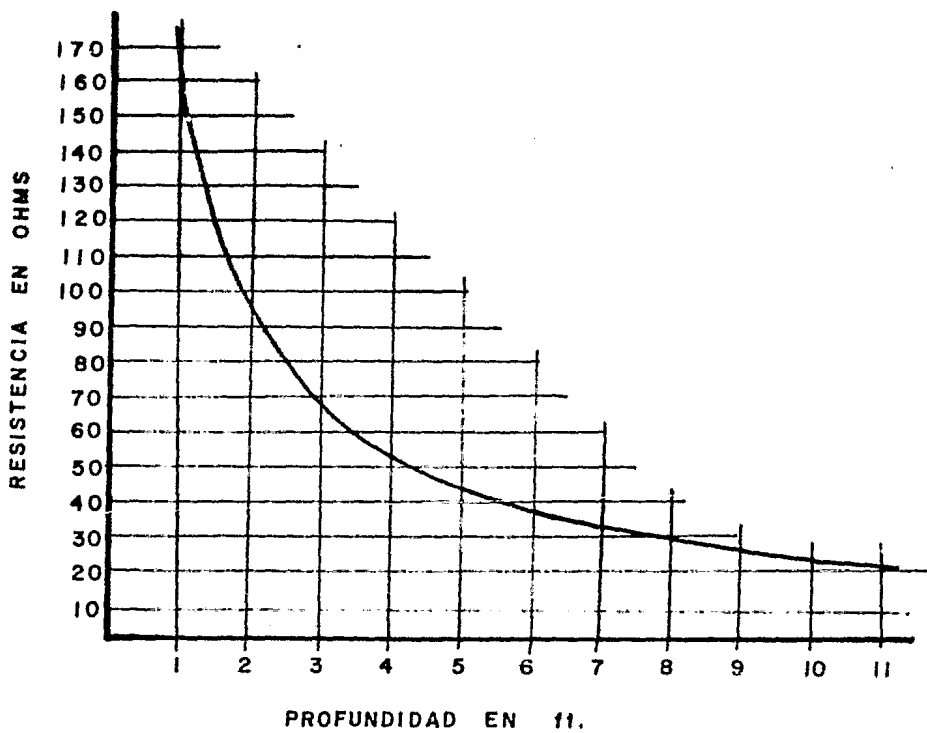


FIG. No. II-4

RELACION ENTRE LA PROFUNDIDAD Y LA RESISTENCIA
DE UN SUELO CON CONTENIDO DE HUMEDAD UNIFORME

TEMA III. CONEXION A TIERRA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION AREA.

III.1.- *Corrientes de fibrilación.* - El hecho de preferir en fechas recientes sistemas sólidamente conectados a tierra, ha aumentado la magnitud de las corrientes a tierra y eso obliga a un diseño meticoloso de redes de tierra para evitar accidentes.

Intensidades de este orden en magnitud, producen gradientes eléctricos elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra, y si se da la circunstancia de que algún ser viviente puentee dos regiones a la distancia de un paso normal, puede sufrir una descarga de magnitud que sobrepase el límite de su engarrotamiento muscular y provoque su caída al suelo, y con esto, abarcando superficie de mayor potencial -- provoca que la corriente que circula por su cuerpo aumente, y si por desgracia ésta pasa por algún órgano vital como el corazón, pueda resultar en fibrilación ventricular y de ahí la muerte.

Lo que regula el engarrotamiento muscular que no permite soltar el objeto electrizado, es la intensidad de la corriente; pero, la tensión aplicada esta relacionada con ésta a través de la resistencia ohmica de la parte del cuerpo que queda en contacto con los potenciales diferentes.

El umbral de percepción se acepta generalmente como de aproximadamente 1 miliampere. El umbral para la fibrilación se acepta generalmente como de aproximadamente 100 miliamperes.

Existen algunas corrientes para soltar:

En el hombre es de 9 miliamperes.

En la mujer es de 6 miliamperes.

La formula de relación para calculo, es:

$$I^2 t = 0.0135$$

$$I = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Donde:

I = Valor efectivo de la corriente que circula en el cuerpo

t = Tiempo de duración del choque eléctrico (Max. 3 seg.).

0.0135 = Constante de fuente empírica.

En la tierra las corrientes se esparcen en todo el espacio y su distribución depende de la conductividad de los materiales que en la superficie terrestre es mucho menor que la conductividad de los metales. De hecho, dos de los constituyentes principales de la tierra, el óxido de silicio y el óxido de aluminio son excelentes aisladores. La conductividad eléctrica de la tierra se debe en gran parte a las sales y a la humedad que contiene.

Por esto, en algunos casos en los que hay que aumentar la conductividad de la tierra para así disminuir su resistencia, se utilizan ingredientes químicos tales como; sales que al reaccionar con los óxidos origina un resultado de disminución en la resistencia de la tierra.

Siendo este método muy costoso no es muy utilizado en zonas de electrificación rural, aunque en algunas instalaciones no debería descartarse su uso.

Parametros que afectan la resistividad:

- a).- Clase de suelo.
- b).- Profundidad de la varilla.
- c).- Humedad del terreno.
- d).- Temperatura.

III.2.- Tomas de tierra para los pararrayos o descargadores.

Si bien es cierto que los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas no pueden prevenirse, no así los daños a transformadores y otros equipos que sí pueden prevenirse por medio de pararrayos.

Los pararrayos son un medio de protección que limitan los sobrevoltajes en los equipos, ya que conducen a tierra las ondas de sobrevoltaje a través de una trayectoria de baja impedancia. Principalmente los pararrayos están constituidos por dos partes básicas una estructura de flameo y un elemento resistivo no lineal o una cámara de expulsión similar a la de un tubo de expulsión de un fusible.

La eficacia de un pararrayos depende en gran manera de que su toma de tierra no presente una resistencia superior a 50 ohms. Esto puede conseguirse enterrando en la tierra, hasta la profundidad de 2.5 a 3 metros, tubos de hierro galvanizado, - - Copperweld etc.

Nota: Los de hierro galvanizado se utilizan para instalaciones provisionales.

Dependiendo del terreno se hace necesario enterrar dos o más tubos a 1 metro de distancia entre ellos y ahondar más los mismos, a fin de asegurar la debida conductancia.

III.3.- Tipos de conexión a tierra en los transformadores.

Las tomas de tierra quedan mejor aseguradas si se interconectan además, entre sí los neutros de las acometidas servidas por varios transformadores inmediatos, formándose así, una red de neutros puesta a tierra en numerosos puntos. Este método no es recomendable para distancias entre transformadores muy largas y de capacidades en KVA muy bajas.

Es preferible para los transformadores una protección por tres puntos, conectando la caja o tanque del transformador (directamente o bien a través de una película aislante), a la terminal de tierra del apartarrayo que se halla unido con el neutro secundario. Todo esto va conectado a tierra a través de una varilla corperwel enterrada, lo más cerca posible de la base del poste.

En las siguientes figuras se muestra este método.

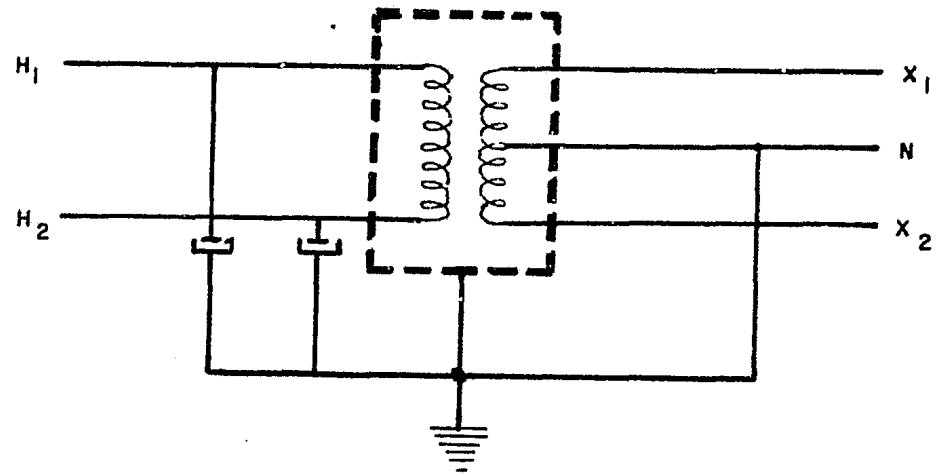
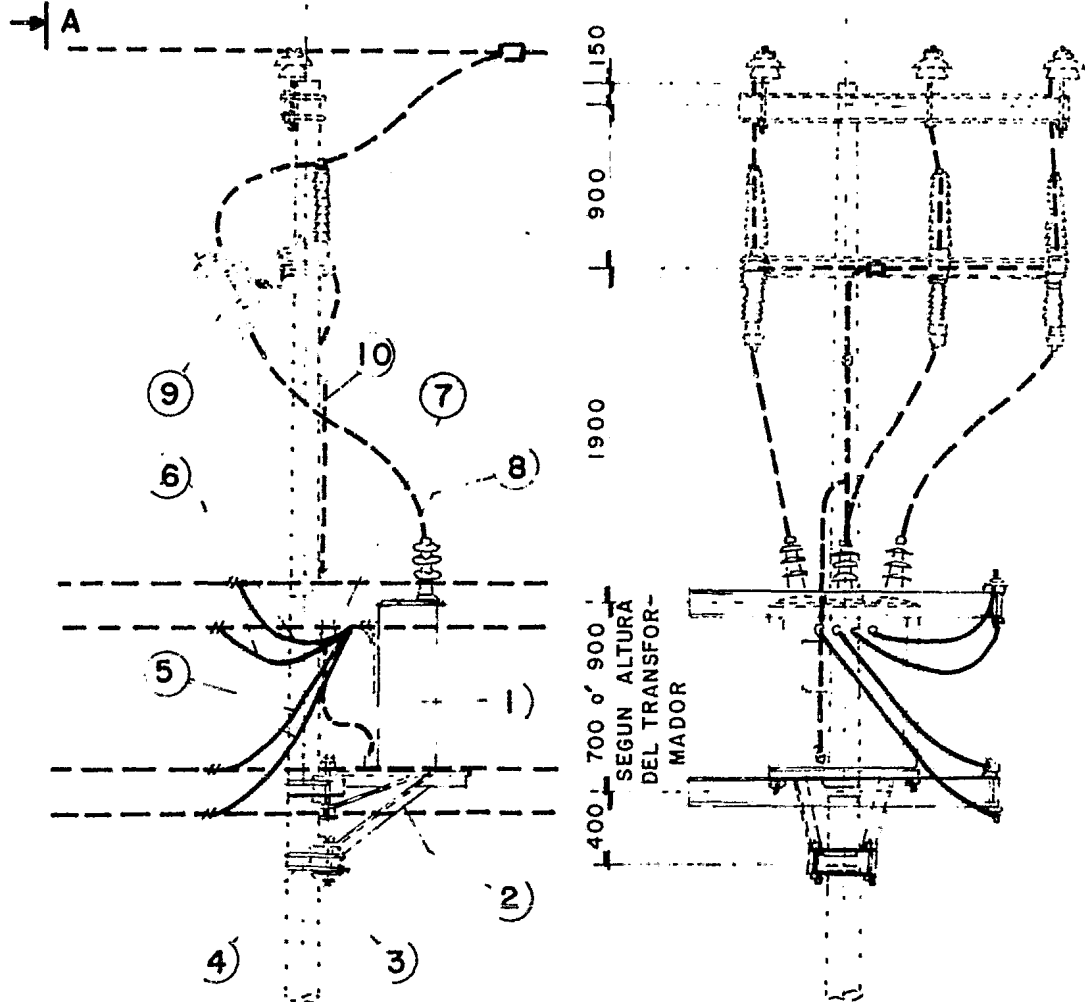


FIG. No. III-1

METODO DE LOS TRES PUNTOS



VISTA A - A

TRANSFORMADOR POSTE 23-45

	NOMBRE	NORMA	UNIDAD	CANT.
1	TRANSFORMADOR 23-BT-45 POSTE	2.0229	Pzo.	1
2	PLATAFORMA 2	2.0155	Pzo.	1
3	DADO 68	2.0134	Pzo.	3
4	ABRAZADERA 6U	2.0038	Pzo.	8
5	CABLE GUIA TRANSFORMADOR 50 L	2.1957.10	Pzo.	2
6	CABLE GUIA TRANSFORMADOR 50 C	2.1957.10	Pzo.	2
7	TORNILLO OJO 5/8 x 2	2.0188	Pzo.	2
8	CABLE ACERO GALVANIZADO 5/16	2.0080	m.	10
9	FUSIBLE 23-3-3C-3MD 20	2.0137	Pzo.	3
10	CABLE CUD 170	2.0102	m.	3

APLICACION:

INSTALADO EN POSTE A-13 a 26 TC CON UN MONTAJE TIERRA Y CONECTADO A LINEAS DE 23 KV. UTILIZANDO UN MONTAJE PARARRAYOS PORTAFUSIBLES 23 TRANSFORMA LA ENERGIA DE REDES PRIMARIAS DE 23 KV A 220 V. ENTRE FASES Y 127 V AL NEUTRO PARA ALIMENTAR REDES Y SERVICIOS DE BAJA TENSION.

CLAVE DEL NOMBRE:

23 = 23,000 Volts
45 = 45 KVA.

FIG. No. III - 2

III.4.- Conexión a tierra de línea aérea.

Las líneas aéreas expuestas a sobrevoltajes ya sean de origen atmosférico o por fallas en el sistema, requieren para su protección generalmente apartarrayos.

El apartarrayos permanentemente se encuentra conectado a tierra de tal forma que, cuando en el sistema se presenta un sobrevoltaje de determinada magnitud el apartarrayo opera.

En las instalaciones que presentan uniones de línea aérea con línea subterránea, es importante el que la tierra del apartarrayo se halle conectada a la cubierta del cable en un punto tan próximo a la terminal de salida como sea posible aparte de su empalme con otra tierra artificial o con el neutro secundario del poste mismo.

El apartarrayo de tipo valvular es el más empleado para la protección de transformadores de distribución ordinarios, este tipo de apartarrayo se caracteriza porque al instante del flameo frena la corriente transitoria, por tal motivo el elemento característico de este tipo de apartarrayo ofrece baja resistencia al flujo de la corriente transitoria y por tanto, mantiene la tensión de descarga a través del apartarrayo en un mínimo. Por otro lado, el elemento ofrece una gran resistencia a la corriente remanente, que precede a la transitoria y como la magnitud de la corriente es limitada, no puede sostenerse por sí sola a través de la estructura de flameo del apartarrayo. Después de la interrupción de la corriente remanente, el apartarrayo queda listo para repetir su ciclo de operación.

La Figura III.3, nos muestra un sistema radial que es el utilizado para poner a tierra las líneas de baja tensión.

Consiste en conectar a tierra el neutro secundario en los remates de la red a través de una varilla coperwel clavada en la base del poste.

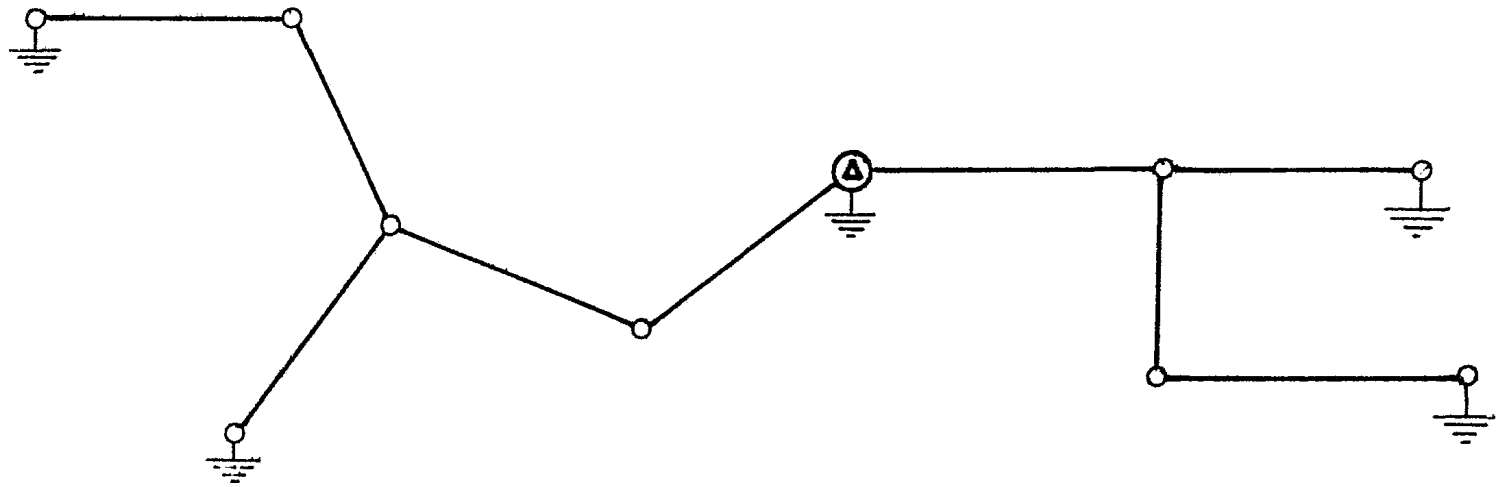


FIG. No. III-3
SISTEMA RADIAL

TEMA IV. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO.

IV.1 .- Introducción.

Los criterios a parámetros de diseño de la red de tierras para una subestación, difieren considerablemente en algunos puntos, comparados al diseño de conexión a tierra de alguna torre de transmisión.

La función de la red de tierras para una subestación es, proporcionar un elemento de conexión a tierra de los neutros, tanques o carcazas de cada uno de los diferentes equipos ubicados en el área de la subestación.

Para el caso de una torre de transmisión, solamente proporciona un elemento de conexión a tierra a la pata de la torre.

Sin embargo, para ambos casos, las ventajas del aterrizamiento al operar en condiciones anormales, el sistema permite la detección y liberación de fallas, y evitar así las pérdidas de energía y los daños a los elementos del sistema debido a sobretensiones y sobrecorrientes de frecuencia nominal.

Las inyecciones de corriente a tierra a través del electrodo, produce elevaciones de potencial en la torre y para los criterios básicos de el diseño de aterrizamiento de la misma, estos potenciales se relacionan al potencial cero normal de la superficie del suelo.

IV.2 .- Criterios de diseño.

Se ha mencionado que al presentarse las elevaciones de potencial peligrosas, los afectados directamente son:

El personal y el equipo, por lo tanto, dividiremos el análisis en estos dos grupos:

IV.2.1.- Seguridad del personal.

Cuando circula corriente de falla a través del electrodo conectado a tierra, se presenta una elevación de potencial del propio electrodo respecto a una tierra remota, la cual se considera de un potencial de cero, esto causa que durante la falla, se presenten en el suelo gradientes de potencial.

Al medir estos potenciales respecto a la tierra remota de potencial cero, pueden poner en peligro la vida de los seres vivos que se encuentren en el área de influencia o en la vecindad comprendida durante el tiempo que dure la falla.

IV.2.2.- Potencial de toque.

Es el potencial máximo que experimentará una persona que se encuentra de pie dentro del área de influencia y que durante la ocurrencia de la falla, este tocando con una o con ambas manos una estructura o cualquier elemento conductor directamente unido a la red de tierras.

De aquí, esta diferencia de potencial se obtendrá al comparar el potencial de la red con el potencial de malla;

$$GPR = I_g R_g$$

Donde:

GPR = elevación de potencial de la red.

I_g = corriente de falla a través de la red.

R_g = Resistencia a tierra de la red.

Definiremos el potencial de malla, como el que existe sobre la superficie del suelo en el centro de una de las mallas de la red.

$$V_{\text{toque}} = GPR - V_{\text{malla}}.$$

IV.2.3.- Potencial de paso.

Es el potencial máximo que se aplicará a una persona entre sus pies, cuando en el instante de una falla se encuentre caminando en el área o inmediatamente fuera de la red.

Prácticamente es aquel que existe entre dos puntos se parados un metro de distancia sobre la superficie del suelo y, en general, este valor es más crítico en los límites del área que cubre la red.

$$V_{\text{paso}} = V_a - V_b$$

Donde:

V_a = potencial del punto a.

V_b = potencial del punto b.

IV.2.4.- Potenciales de transferencia.

Cuando ocurre una falla en una subestación, es muy frecuente que, debido a la presencia de estructuras enterradas cercanas a la subestación, se presenten en estas los potenciales de transferencia.

Estos potenciales pueden ser muy peligrosos de aquí la necesidad de su limitación.

Para limitar estos potenciales de transferencia peligrosos, se instalan juntas aislantes en las estructuras enterradas o superficiales, cercanas a la subestación (tuberías metálicas de agua, vías de ferrocarril, etc.); en el caso de cables de comunicación se podrán instalar transformadores de aislamiento.

IV.3.- Parametros de diseño.

En el capítulo anterior se mencionó la influencia del medio ambiente en la conexión a tierra, la cual determina los parametros básicos para el diseño de la conexión a tierra.

Los factores importantes a considerar y que son indispensables para un buen diseño son:

a).- Corriente de falla: Este es el punto de partida para determinar la magnitud de la corriente que será inyectada a tierra a través del electrodo o electrodos a tierra.

La corriente de falla debe ser de un valor igual a la corriente de falla de una fase a tierra, y en ningún caso se debe de tomar el valor correspondiente a la corriente de falla trifásica, el cual es muy útil para cálculos de capacidad interruptiva pero, que arroja valores mayores a los de corriente de fase a tierra.

b).- Resistividad del terreno: Este parametro, junto con el anterior, es el que más influye para determinar las características de la red de tierras, y si algún procedimiento de diseño no parte de las mediciones de campo, por eficiente y exacto que sea, será inadecuado.

c).- Area de aplicación: Es muy importante que al mismo tiempo de realizar la localización física de la estructura, se lleve a cabo la medición de la resistividad del suelo, para que desde el inicio del diseño sea correcto el procedimiento.

d).- Potenciales de paso y de toque: Con el fin de asegurar la protección de seres vivos dentro del área de instalación, cuando ocurre una falla, es necesario limitar estos potenciales a valores normalizados.

Por norma, estos valores son:

$$\begin{aligned} V_{\text{paso}} &= 116 + \frac{.7}{t} \text{ ps} \\ V_{\text{toque}} &= 116 + \frac{.17}{t} \text{ ps} \end{aligned}$$

Donde: ρ_s = Resistividad superficial del terreno.

t = Tiempo de liberación de falla.

Se recomiendan valores de:

ρ_s = 3000 Ω m (para roca triturada)

t = 0.5 seg. (normalizado)

TEMA V. MEDICIONES DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

V.1.- Introducción.

La determinación de las características del suelo es de gran importancia si se desea mejorar el valor de la conexión a tierra.

Las mediciones directas en el terreno, proporcionan datos que permiten establecer un modelo de conexión a tierra adecuado.

Se debe evitar la aplicación de tabulaciones generales como la que se muestra en la Tabla V.1, ya que algún modelo de conexión a tierra que sea el adecuado para una torre, no siempre será el mejor para una torre vecina.

Por lo tanto, las mediciones directas de la resistividad del suelo, proporcionan un dato valioso para llevar a cabo un diseño adecuado de un modelo de aterrizamiento de la torre.

TABLA V.1

NATURALEZA DEL SUELO	RESISTIVIDAD PROMEDIO (OHMS-MT.)		
<i>Terreno vegetal</i>	1	-	50
<i>Arcilla</i>	2	-	100
<i>Arena y grava</i>	50	-	1000
<i>Superficie calcárea</i>	5	-	4000
<i>Arcilla Granulada</i>	5	-	100
<i>Roca porosa</i>	20	-	2000
<i>Granito balzato, etc.</i>	5	-	1000
<i>Roca cristalina</i>	50	-	500
<i>Terreno de cultivo</i>	10	-	100

V.2.- *Objetivos de la medición de la resistividad del suelo.*

- a).- *Para estimar la efectividad de la resistencia a tierra de una estructura o sistema de aterrizamiento.*
- b).- *Para la estimación de los gradientes de potencial, incluyendo voltajes de paso y de toque.*
- c).- *Para el diseño de protección catódica.*
- d).- *Para comparar el acoplamiento inductivo entre circuitos de comunicaciones y de potencia vecinos.*

V.3.- Métodos de medición.

V.3.1.- El método de Wenner.

- Es necesario pasar corriente a través del suelo para medir su resistividad, para esto se insertan electrodos en el suelo y así se logra la circulación de la corriente.

La configuración de este método lo muestra la Fig. (V.2), donde los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad. Los valores de las mediciones dependen de la distancia entre electrodos y de la resistividad del suelo, jugando un papel muy importante el contacto que se haga con la tierra que circunda al electrodo.

Al tener la configuración de los cuatro electrodos en línea recta, si la profundidad de los electrodos, la distancia de separación y la resistencia que se oponga al paso de la corriente se conocen, la resistividad específica estará dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \pi AR}{\frac{2a}{1 + a^2 + 4b^2} - \frac{2a}{4a^2 + 4b^2}} = \frac{4 \pi AR}{n}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno (OHMS - MT.)

R = Resistividad media (OHM)

a = Distancia entre electrodos (Mts.)

b = Profundidad de penetración de los electrodos.

n = Factor aproximado con un valor entre 1 y 2, dependiendo de si: b = a, n = 1.187; si b = 2a, n = 1.030; si b = 4a, n = 1.003.

La expresión anterior se aproxima a:

$$\rho = 4 \pi aR$$

$$\rho = 2 \pi aR$$

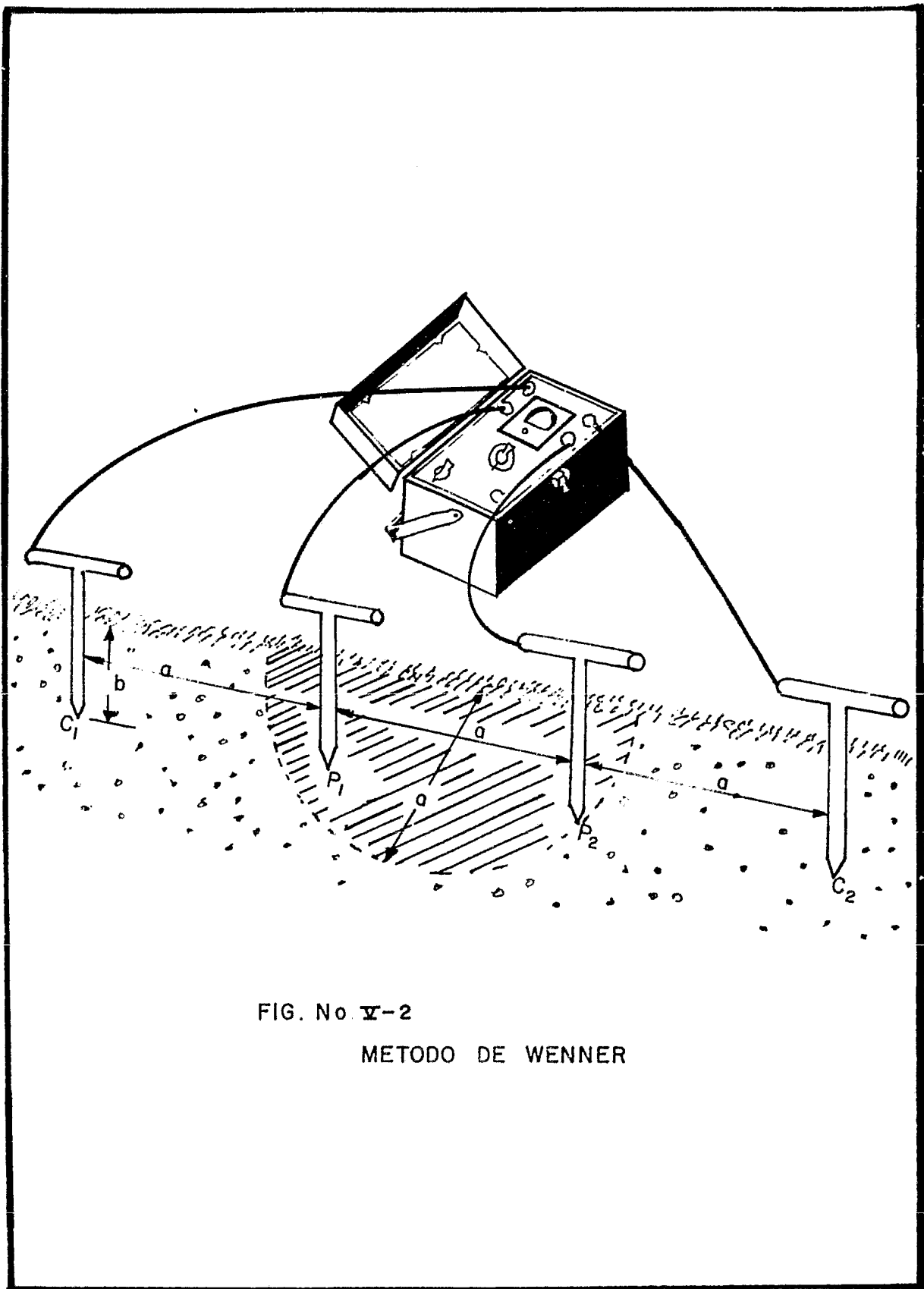


FIG. No. V-2

METODO DE WENNER

V.3.2.- Método de Schlumberger.

Este método es una modificación del método anterior empleando cuatro electrodos también pero, dejando constante la separación entre los electrodos centrales o de potencia, así se realizan diversas mediciones variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores a distancias múltiples de la separación base de los electrodos internos "a" la configuración de este método se muestra en la Fig. (V.3).

Este método es recomendable cuando el Megger de tierras no tiene la precisión adecuada para cubrir el rango de mediciones a las diferentes distancias entre los electrodos es decir, cuando se tienen valores bajos de resistividad del suelo del orden de 20 OHMS - MT. o menos para los cuales con el método de Wenner se introducen errores debido a la falta de precisión.

Expresión de Schlumberger:

$$P_a = \pi R_n (n + 1)$$

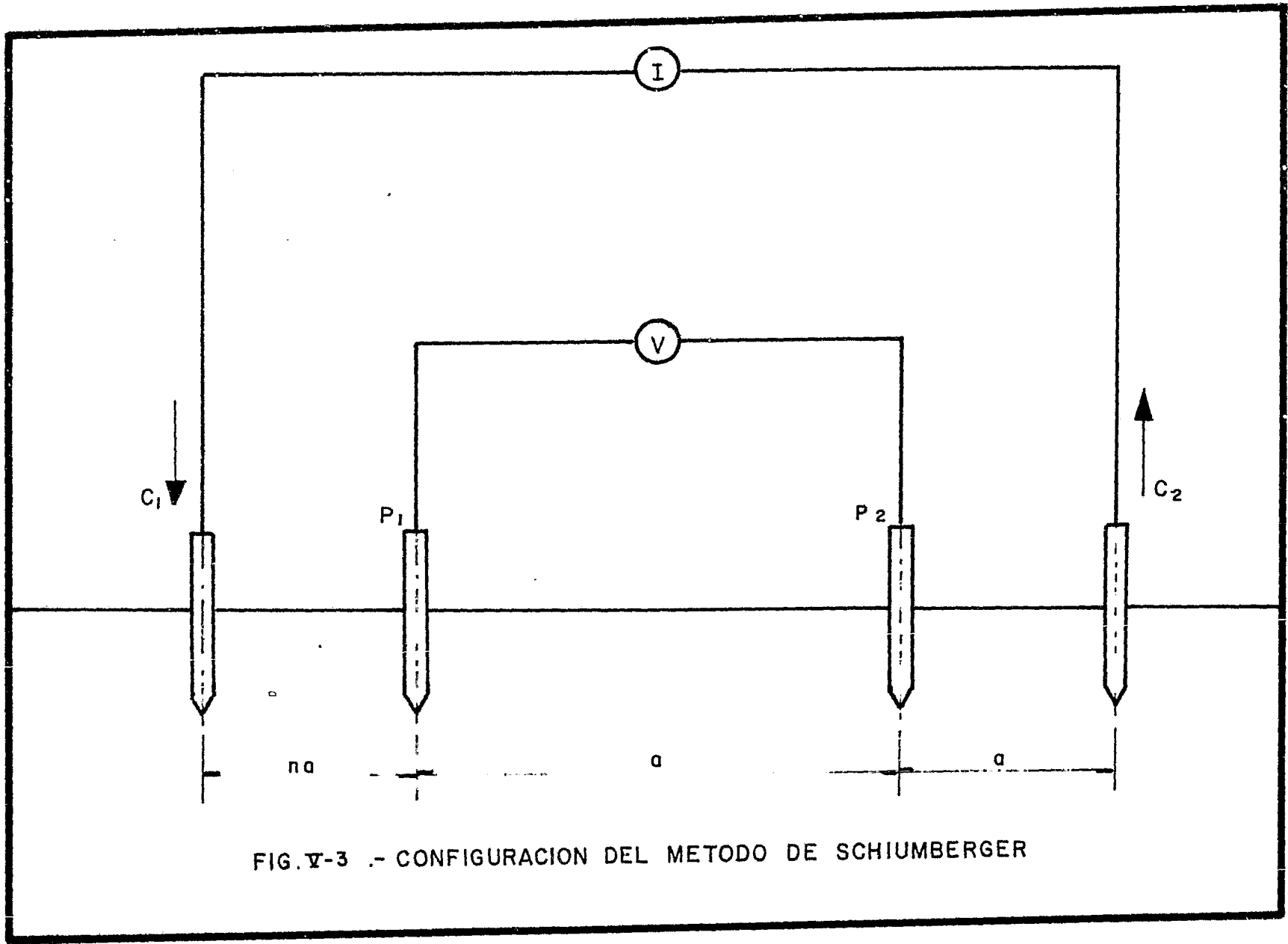


FIG. V-3 .- CONFIGURACION DEL METODO DE SCHIUMBERGER

V.4.- Recomendaciones practicas para realizar las mediciones.

Independientemente del método y de los aparatos que se usen para realizar las mediciones, se deben realizar exclusivamente en la zona o área donde sea localizada la torre o equipo.

Preferentemente estas mediciones se deben de realizar en la época de sequía, o en ocasiones en que exista un tiempo considerable entre el último día de lluvia y el día de la medición.

Cuidados que se deben de tomar al efectuar las mediciones:

- a).- Las conexiones de los cables se deben realizar usando guantes aislantes.
- b).- Mantenerse lo más alejado posible del electrodo de corriente en el momento de inyectar la corriente.
- c).- Medir el voltaje de la batería cada vez que se vaya a usar y así estar seguro del buen funcionamiento del aparato para la obtención de lecturas reales.

TEMA VI. MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO.

VI.1.- Introducción.

Los sistemas eléctricos se conectan a tierra para reducir el peligro del shock eléctrico al personal y drenar a tierra las corrientes inducidas, producto de las descargas eléctricas.

La instalación y los chequeos periódicos son esenciales para el mantenimiento de una segura y efectiva conexión a tierra.

Las mediciones de la resistencia a tierra de un electrodo es el único camino seguro para determinar, si la conexión a tierra es satisfactoria y además para determinar si son necesarios electrodos extras o medios correctivos diferentes.

Los requerimientos generales de las conexiones a tierra son relativamente simples pero, el chequeo de cada uno de ellos es esencial para estar seguros del buen funcionamiento de éstas.

VI.2.- Objetivos de la medición de la resistencia a tierra.

Las mediciones de la resistencia a tierra y los gradientes de potencial en la superficie de la tierra, debidas a la corriente que fluye a tierra son necesarias para:

- a).- Determinar la resistencia actual de la conexión a tierra.
- b).- Determinar las elevaciones de los potenciales en la tierra y su variación a través de una área, que resulta del flujo de corriente de falla a tierra en un sistema de potencia.
- c).- La conveniencia de un valor de la resistencia a tierra a pie de torre para la protección contra las descargas atmosféricas.
- d).- Diseñar la protección para el personal, para los circuitos de potencia y de comunicación.

VI.3.- Métodos de medición.

VI.3.1.- Método de los dos puntos.

En este método se mide la resistencia total de la tierra desconocida y la resistencia de la tierra auxiliar. La resistencia de la tierra auxiliar se considera despreciable en comparación con la de la tierra desconocida Fig. No. (VI.1).

La aplicación usual de este método es para determinar la resistencia de una sola varilla de tierra enterrada cerca de un suministro de agua que usa tubos de metal. La tierra del tubo metálico se considera de un valor de 1 ohm y debe ser bajo en relación con el máximo para tierra, el cual es usualmente del orden de 25 ohms.

Este método está sujeto a errores grandes para valores bajos de resistencia a tierra pero, es muy adecuado donde para estos tipos de pruebas es todo lo que se requiere.

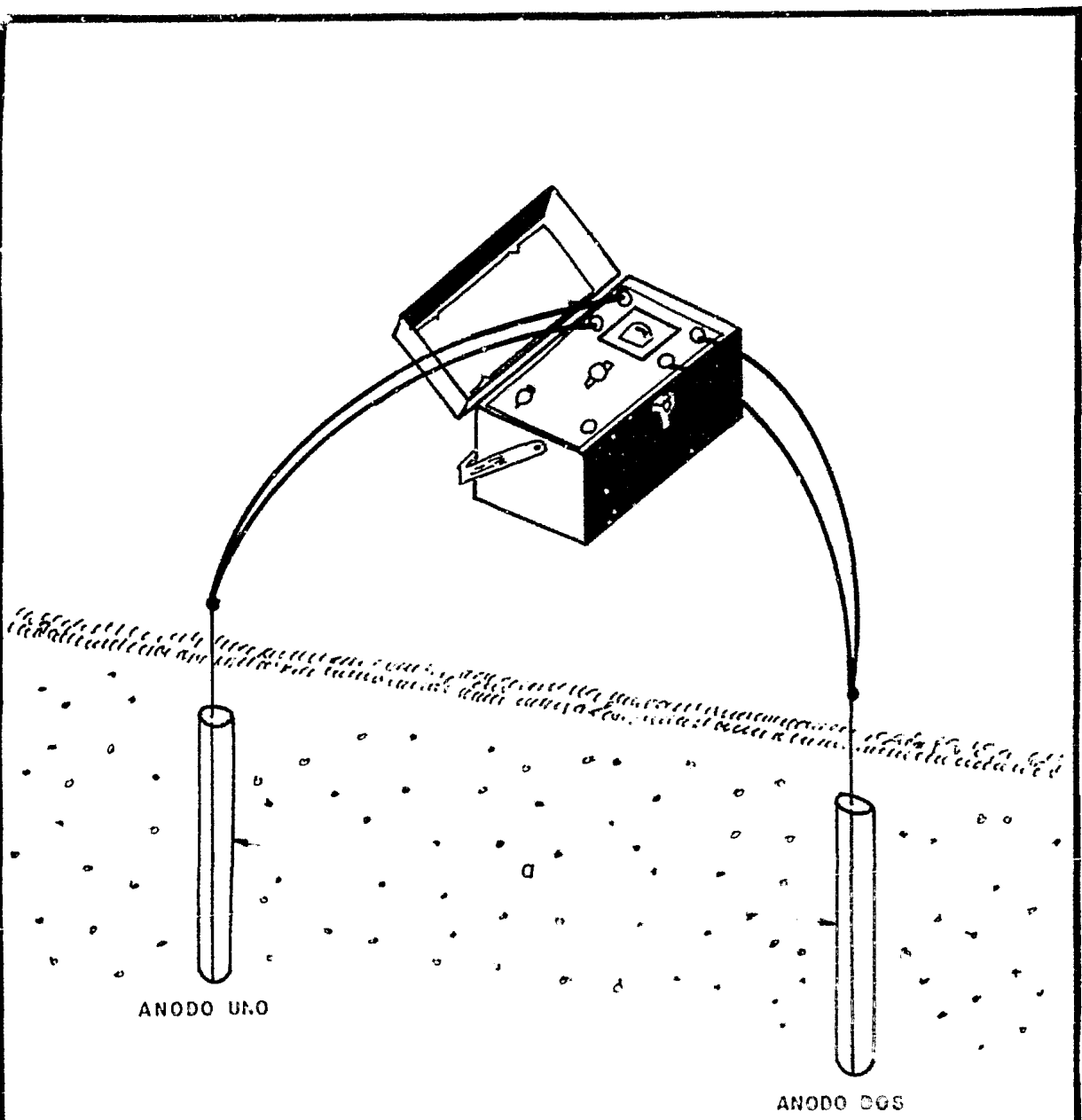


FIG No. VI-1

METODO DE LOS DOS PUNTOS

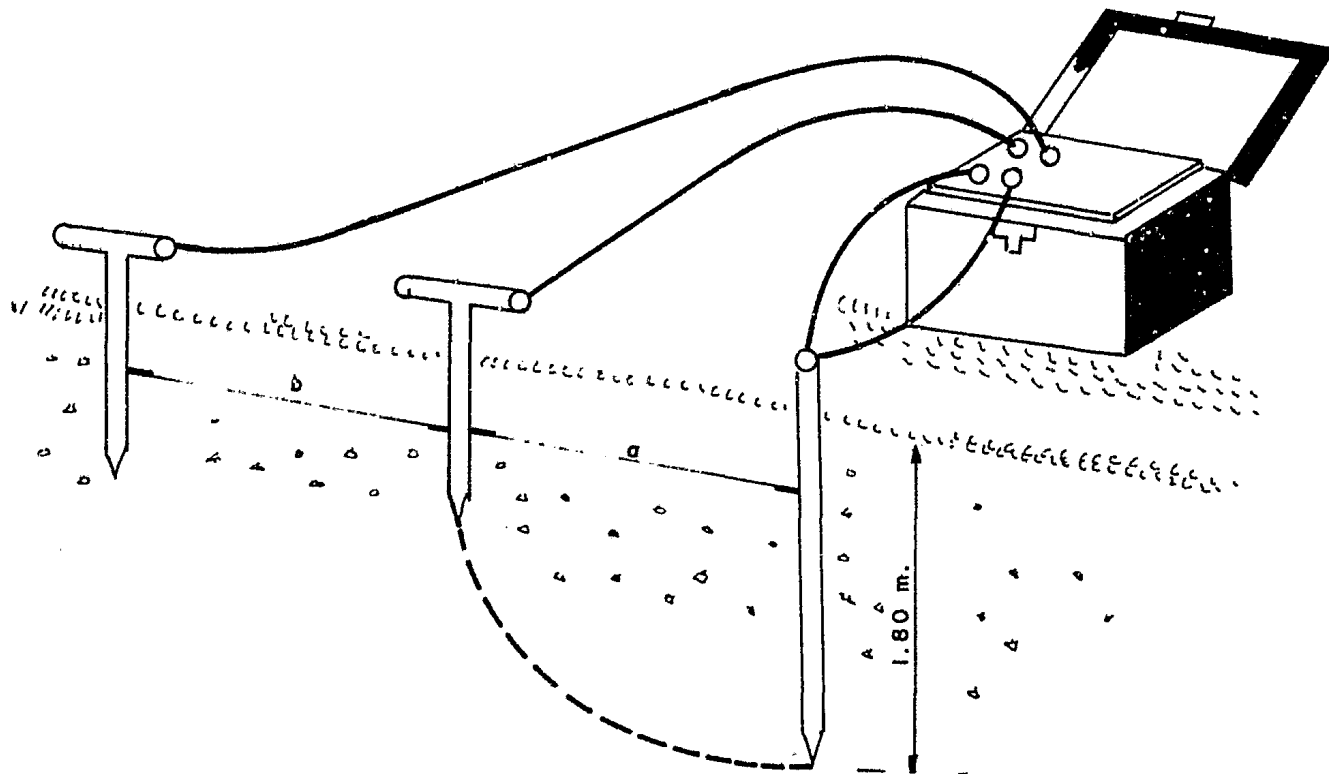


FIG. No. VI-2
 METODO DE LOS TRES PUNTOS

VI.3.2.- El método de caída de tensión.

Este método se aplica comunmente para medir la resistencia a tierra de un electrodo Fig. (VI.3.)

Donde (E) es el electrodo bajo prueba, (P) y (C) son dos electrodos auxiliares colocados a distancias apropiadas de (E). Cuando circula una corriente conocida (I) entre los electrodos (E) y (C), midiendo entre (E) y (P), la diferencia de potencial (V).

La relación V/I para una resistencia, la cual bajo condiciones adecuadas no representa la resistencia buscada (E). Aunque el electrodo (C) esta en la trayectoria principal de la corriente y su resistencia es uno de los factores que determinan la magnitud de la corriente (I), que a su vez determina el valor de (V), por lo que la relación V/I es independiente de la resistencia de (C).

La resistencia del electrodo auxiliar (P) es parte del circuito empleado para medir la diferencia de potencial (V), usualmente la medición se realiza con un aparato de balance nulo, por lo tanto, no circulara corriente a través de (P) en el instante de lograr el equilibrio para la medición.

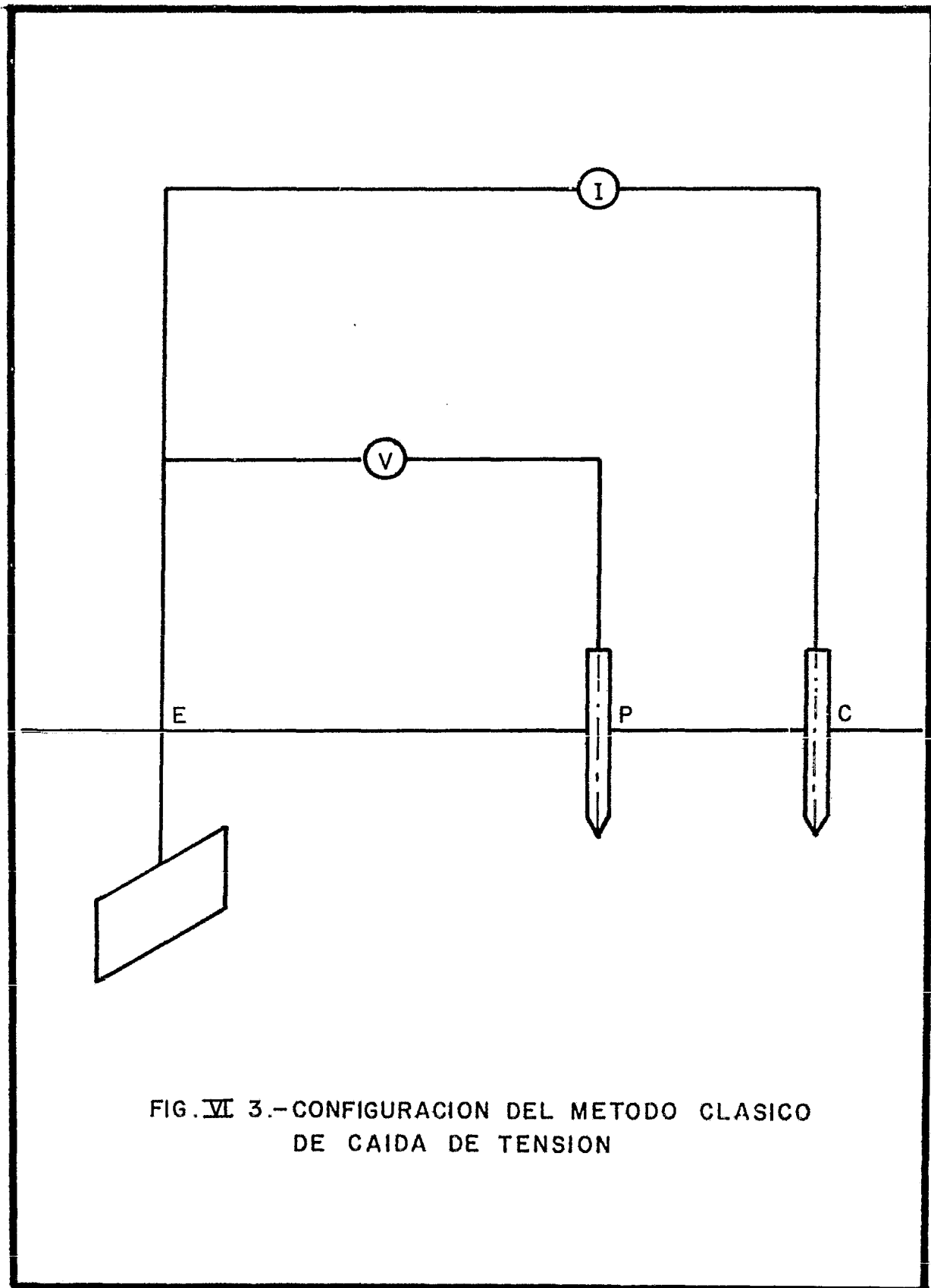


FIG. VI 3.-CONFIGURACION DEL METODO CLASICO DE CAIDA DE TENSION

TEMA VII. INSTRUMENTOS PARA REALIZAR LAS MEDICIONES.

VII.1. - Megger de balance nulo.

Este aparato genera una corriente alterna, para medir con este aparato, físicamente se realiza lo siguiente:

Se acciona el interruptor de presión o manivela según el caso, y dependiendo del sentido de la desviación -- de la aguja del aparato, se aumenta la resistencia -- para una desviación positiva o se disminuye para una desviación negativa.

El valor representado por las perillas se multiplica por el factor de escala seleccionado y así, se obtiene el valor final de la medición Fig. (VII.1).

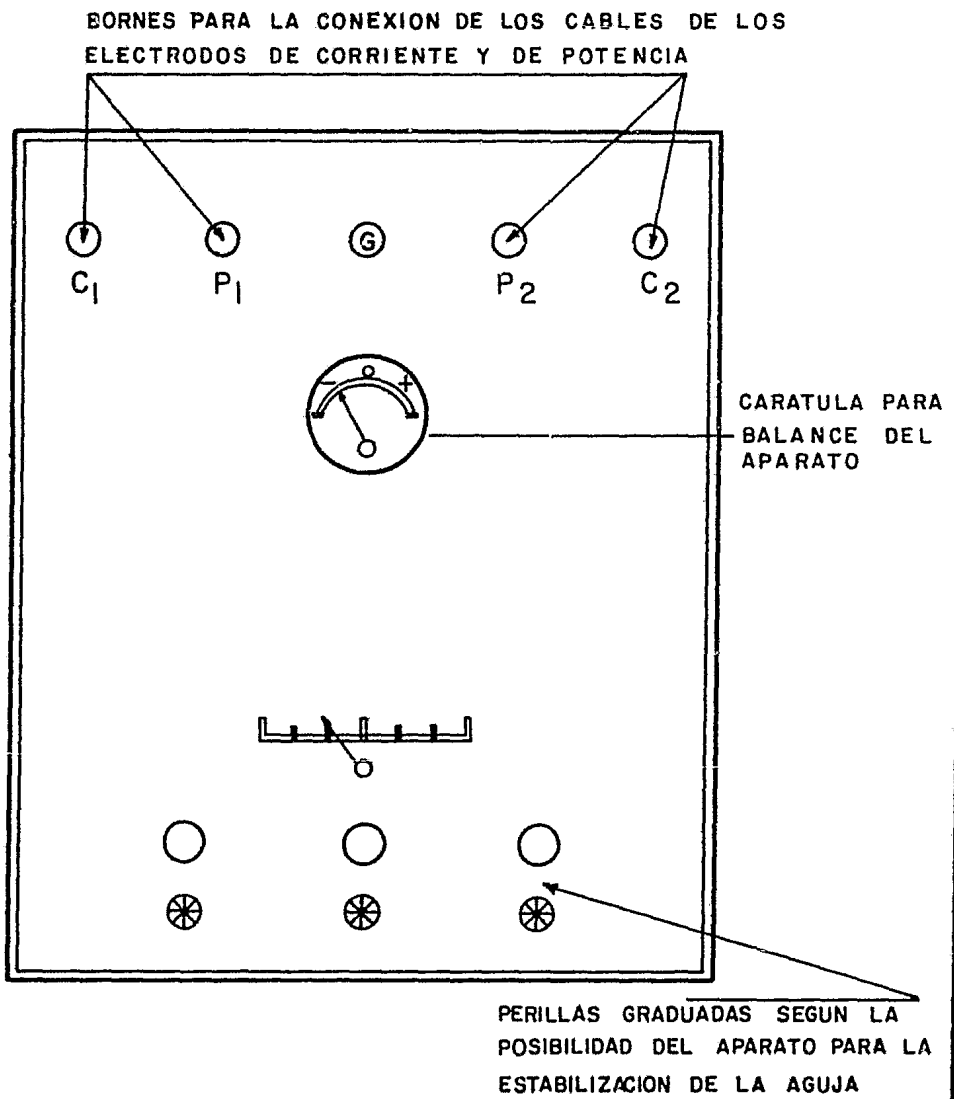


FIG. VII-1

MEGGER DE BALANCE NULO
(Modelo básico o común)

VII.2.- Megger de lectura directa.

Este aparato genera una corriente continua por medio de un dinamó accionado por una manivela Fig. (VII.2).

Esta corriente se invierte periódicamente y así, se evitan las corrientes parásitas electrolíticas del suelo que inducen errores en la medición.

La lectura se obtiene directamente al accionar la manivela y leer la desviación de la aguja de la carátula del aparato.

Comparando este método y el de balance nulo, se observa que -- para suelos con resistividades muy altas, es muy ventajoso -- utilizar el Megger de lectura directa, ya que con el de balance nulo, para lograr la compensación y poder leer el valor de la medición, se necesitan inyecciones de corrientes grandes.

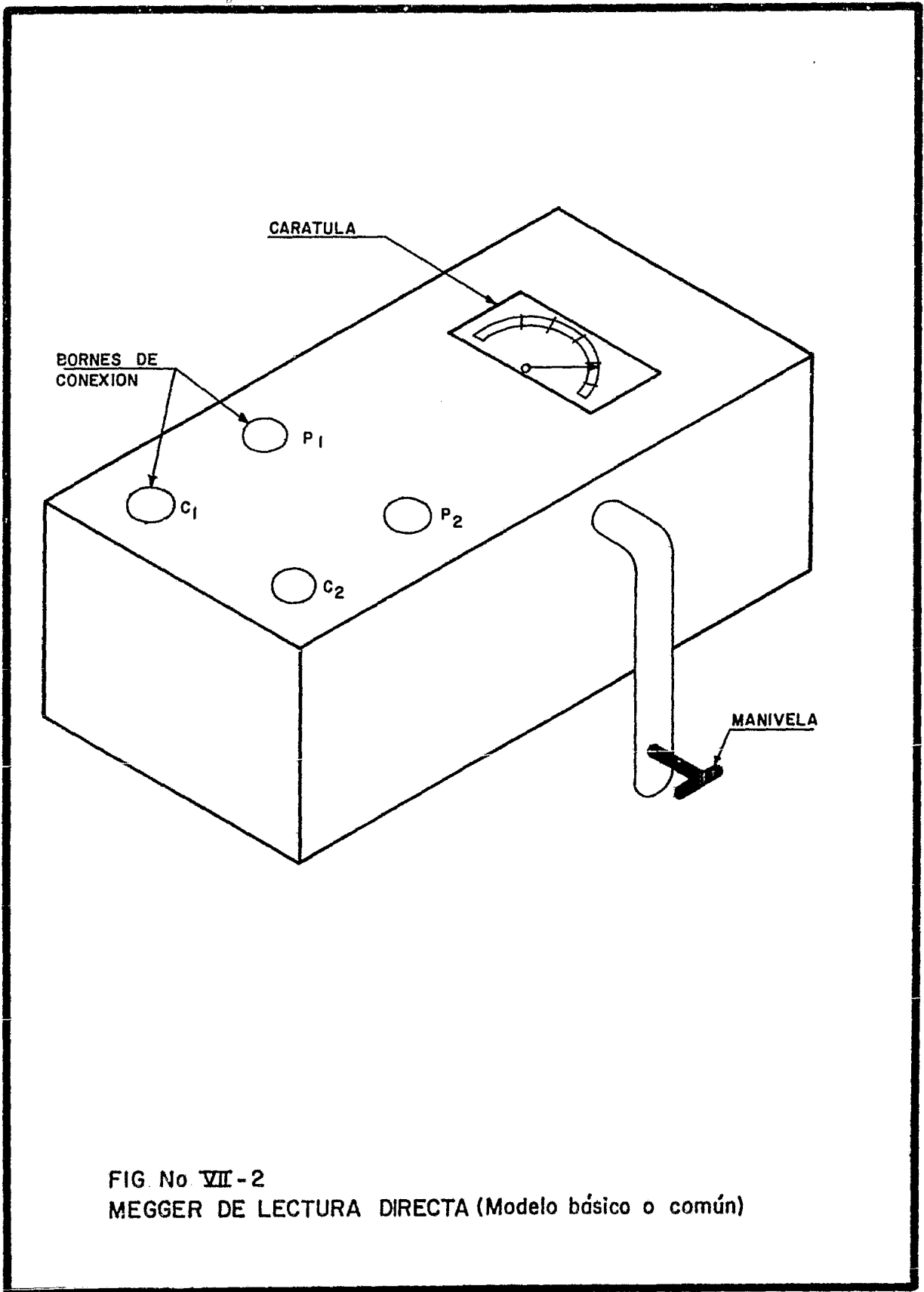


FIG No VII-2
MEGGER DE LECTURA DIRECTA (Modelo básico o común)

TEMA VIII. DISEÑO PRELIMINAR DE LA CONEXION A TIERRA.

VIII.1.- Introducción.

Se ha mencionado que el medio ambiente y la estructura transversal y longitudinal, influyen notablemente en la resistividad del suelo, por lo que al realizar la medición e interpretación de los resultados, es necesario definir la metodología para considerar a la resistividad del suelo como un parámetro de diseño.

En la actualidad, gracias a los planteamientos de diversas teorías, el desarrollo de procedimientos de cálculos de las redes de tierra se han perfeccionado, que el uso de la computadora digital es una herramienta de trabajo muy importante dado que las expresiones planteadas, por su complejidad no permiten cálculos manuales rápidos.

Enseguida se plantea un procedimiento simplificado, con lo que se determinarán los parámetros básicos del diseño preliminar de la conexión a tierra.

VIII.2.- Datos para el diseño.

Las funciones básicas de una conexión a tierra en la estructura o torre de transmisión, son:

- a).- Limitar los potenciales de paso y de toque a valores tolerables para seguridad del personal.
- b).- Controlar la elevación del potencial en el área de la red sobre el potencial natural del suelo, durante la ocurrencia de alguna falla.
- c).- Controlar los sobrevoltajes durante las fallas y facilitar la operación de los dispositivos de protección correspondientes.

VIII.2.1.- Datos básicos.

Estos datos básicos para la realización del diseño de una conexión a tierra son los siguientes:

- a).- Resistividad del suelo.- Se ha mencionado aquí la necesidad de contar con datos o valores obtenidos de las mediciones de campo realizadas en el área de instalación.
- b).- Corriente de falla.- Cabe mencionar que es muy importante diferenciar de los valores correspondientes de falla a tierra a la corriente de falla trifásica que se usa para especificaciones de capacidad interruptiva.

VIII.2.2.- Parametros considerados.

- a).- Area de la red de conexión a tierra. La inconveniencia del uso de una red limitada, arrojará un valor límite de la resistencia a tierra del electrodo, a las ventajas del uso de una área no limitada, con lo cual se logrará el valor de la resistencia buscado para el electrodo a tierra.
- b).- Longitud del conductor de la red.- Conociendo este valor se puede adoptar una configuración sobre el área disponible, esta longitud la determinan las necesidades de controlar los potenciales de paso y de toque.
- c).- Sección transversal del conductor.- Teóricamente de la capacidad térmica por el paso de la corriente de falla, dependerá el diámetro del conductor pero, en realidad este diámetro está limitado -- por su rigidez mecánica.
- d).- Varillas a tierra.- Se mencionaron anteriormente las ventajas de su uso, además de distribuir efectivamente la corriente de falla a tierra.

VIII.3.- Procedimiento tradicional para el cálculo de la resistencia - de la conexión a tierra.

Este es uno de varios procedimientos para el cálculo mencionado, que tiene sus particularidades al proponer sus planteamientos siguientes:

VIII.3.1.- Elementos de la red.

- a).- Resistencia deseada para la conexión a tierra. Este valor depende de la corriente de falla -- (I_f), y la elevación del potencial en el área de aplicación.

Aplicando la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{E_{Pc}}{I_f} \quad - - - \text{(VIII.1)}$$

Donde: R_c = Resistencia de la conexión a tierra.

E_{Pc} = Elevación aceptable de la conexión a tierra.

I_f = Corriente de falla.

Este valor de R_c se considera objetivo, ya que - el valor final de R_c , dependerá del área y la -- longitud del conductor.

Para E_{Pc} , esta limitado por el nivel de aislamiento de los equipos de control y comunicación; tradicionalmente se ha usado 5 KV, actualmente considerando la existencia de corriente de falla superiores a 10 KA, se plantea la posibilidad de -- usar 10 KV.

- b).- Longitud del conductor de la red.- Se determina por la necesidad de limitar los potenciales de - paso y de toque.

El potencial de toque impone más restricciones - de diseño, por lo que se usará como parámetro -- básico para este cálculo.

El potencial de la malla en el área de aplicación se dará por la siguiente expresión:

$$V_m = K_{\text{mesh}} a \frac{I_f}{L}$$

Donde:

a = Resistividad del suelo (ohm-m)

I_f = Corriente de falla inyectada a la red. (amps)

L = Longitud del conductor de la red.

K_{mesh} = Es el factor malla, que usualmente se define con expresiones empíricas; para esta etapa del diseño se tomará un valor de 1.7.

Se tiene la siguiente expresión normalizada, para el valor límite del potencial del toque.

$$V_t = \frac{116 + .17 \text{ as}}{\sqrt{t}}$$

La expresión para la longitud del conductor será:

$$L = \frac{K_{\text{mesh}} \text{ as } I_f}{V_t}$$

c).- Área de la red.- La resistencia de un electrodo de puesta a tierra, está determinada por la longitud del conductor y el área de la instalación; para esta parte del cálculo se considerará que la resistencia de la conexión a tierra - obtenida por la expresión VIII.1, constará de dos componentes:

$$R_c = R' + r'$$

Donde:

R' = Efecto del área de la aplicación sobre la resistencia de la red.

r' = Efecto de la longitud del conductor en la resistencia de la red.

$$R' = 1.6 \frac{P}{P}$$

Donde:

P = Resistividad del suelo (ohm-m)

\underline{P} = Perímetro de la conexión (m)

Para:

$$r' = 0.6 \frac{a}{L}$$

Donde:

a = Resistividad del suelo (ohm-m)

L = Longitud del conductor (mts.)

d).- Tamaño del conductor.- Normalmente se aceptan - conductores de 2/0 ó 4/0, por razones mecánicas.

e).- Varillas a tierra.- Se aplica la siguiente expresión:

$$N_v = 1.125 R_v$$

Donde:

N_v = Número de varillas.

R_v = Resistencia metálica de una varilla.

Esta dada por:

$$R_v = \frac{p}{1.915 L} \left(\log_e - \frac{48L}{d} \right)$$

Donde:

L = Longitud de la varilla (pies)

d = Diámetro de la varilla (pulgadas)

Esta R para varillas de 10 pies (3 mts.) de longitud y 3/4 pulg. (19 mm) de diámetro, se reduce a:

$$R = 0.337 \text{ ohms.}$$

f).- Profundidad de la colocación del sistema de tierras:

Se considera adecuado a profundidades del orden de 0.5 a 0.7 mts.

BIBLIOGRAFIA.

GUIA NO. 80 DE LA IEEE PUBLICADA EL 30 DE JUNIO DE 1976.

LA PROTECCION DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION CONTRA LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.- W. W. Lewis.

COMPORTAMIENTO DEL ATERRIZAMIENTO DE UNA LINEA DE TRANSMISION EN UN SUELO NO UNIFORME.- F. Dawalibi y W. G. Finnex IEEE.

CONEXION A TIERRA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION AREA.- Ing. D. - Flores Estrada.

SUELO UNIFORME A TODAS LAS PROFUNDIDADES. Oficina de Standards- Artículo Técnico No. 8.

GUIA NO. 8 DE LA IEEE PUBLICADA EL 30 DE JUNIO DE 1976.

METODO PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.- F. Wenner.

COMENTARIOS SOBRE LA CONFIGURACION. - F. Wenner.

UNA NUEVA CONTRIBUCION PARA LOS ESTUDIOS DE SUBSUELO POR MEDIO DE MEDICIONES ELECTRICAS EN HOYOS.- M. Schlumberger. Publicación Técnica No. 503 AIMME.

GUIA PARA LA MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA Y LOS GRADIENTES DE POTENCIAL EN LA TIERRA.- Guía No. 81 de la AIEE publicada el 15 de mayo de 1962.

INSTRUMENTOS DE MEDICION.- Associated Research.