

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



**Diagnóstico, Corrección y Mantenimiento
de Puestas a Tierra en Infraestructura
de Alta Tensión**

T E S I S

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO ELECTRICISTA

Valdemar Vergara Vargas

Promoción 1980-2

Lima - Perú

1985

A MIS PADRES

RECONOCIMIENTO

Deseo expresar mi especial gratitud al Ing. Justo YANQUE MONTUFAR, por haber sido la persona que motivó y estimuló la realización de esta Tesis, a través de sus consejos y sugerencias basados en su experiencia en el tema de las Puestas a Tierra.

Mi reconocimiento a los Ingenieros y Personal Técnico de las diferentes dependencias de ELECTROPERU S.A. que colaboraron en la ejecución de la parte experimental a lo largo del Sistema Interconectado, especialmente a los Servicios Centro y Sur de la Unidad de Transmisión - Gerencia de Operaciones.

De igual manera, mi reconocimiento a la Sra. María S. VENTO MARTELL por su constante apoyo y ayuda para materializar este trabajo.

RESUMEN

DIAGNOSTICO, CORRECCION Y MANTENIMIENTO DE PUESTAS A TIERRA EN INFRAESTRUCTURA DE ALTA TENSION

AUTOR : BACHILLER VALDEMAR VERGARA VARGAS

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

LIMA, 1985

Durante la operación de los Sistemas Eléctricos en Alta Tensión, ocurren con mucha frecuencia perturbaciones por contorneo inverso, originadas por la incidencia de Descargas Atmosféricas sobre estructuras con Resistencia de Puesta a Tierra elevada, eventualidad que motivó el presente trabajo, trazándose como objetivo la obtención de un conjunto de procedimientos para la evaluación, corrección y mantenimiento de los Aterramientos. El estudio desarrollado comprende un examen teórico de las puestas a tierra tomando como fuente la literatura existente tanto en nuestro medio como en otros países; luego, una aplicación práctica de las técnicas de mediciones y las observaciones de campo, así como las pruebas de corrección de Puestas a Tierra y estadística de datos; para finalmente obtener conclusiones.

Debido a que uno de los objetivos principales de las Puestas a Tierra es la disminución de los gradientes peligrosos, en el primer Capítulo de la Tesis se hace un estudio teórico de este punto, indicando las

causas de su aparición y las repercusiones que puedan tener en lo que se refiere a seguridad humana, funcionamiento de los equipos y estabilidad del Sistema. En lo que respecta a protección del personal, se sigue una evaluación de las magnitudes de corriente eléctrica que podría soportar el cuerpo humano sin ningún peligro, indicando además las máximas tensiones de toque y paso permitibles por una persona.

A continuación, en el Capítulo 2 se muestran diversos métodos de cálculo para el diseño de un Sistema de Puesta a Tierra y Aterramientos, ya sea de Subestaciones, Líneas de Transmisión o Edificaciones Especiales, empleando los procedimientos de cálculo tradicionales y también métodos de cálculo digital que involucran el uso de computadoras. Asimismo, se analiza el comportamiento dinámico de diversas configuraciones de Puesta a Tierra, mostrando el efecto que puede tener este fenómeno en la operación de los Sistemas Eléctricos con frecuentes fallas de tipo transitorio.

Los diferentes métodos de medición de Resistividad del Suelo, Resistencia de Puesta a Tierra, Perfil de Potencial y Tensiones de Toque y Paso son descritos en el Capítulo 3, indicando además la manera de interpretar cada uno de los resultados obtenidos. También se adjuntan algunos ejemplos de mediciones experimentales, con los datos y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en su mayoría en el Sistema Interconectado de ELECTROPERU. Otro punto tratado en este Capítulo es el fenómeno de circulación de corrientes inducidas en lazos cerrados a través de la infraestructura de las Subestaciones y Líneas de Transmisión, el cual es analizado y comprobado con las mediciones experimentales hechas en bajadas de puesta a tierra que hacen anillo con el cable de guarda y el suelo.

El Capítulo 4 incluye un conjunto de recomendaciones para corregir la Resistencia de Puesta a Tierra, referidas más que todo a problemas ocurridos en Líneas de nuestros Sistemas Eléctricos en 220 kV, los cuales

tienen la peculiaridad de contar con tramos conflictivos en su mayor parte en zonas con elevada Resistividad del Suelo y con frecuentes Descargas Atmosféricas. Como resultado de las experiencias realizadas se proponen algunas directrices que deben ser tomadas en cuenta al momento de programar el mantenimiento de los Sistemas de Puesta a Tierra.

Finalmente, se dan a conocer las Conclusiones a las que se ha llegado con el desarrollo de la presente Tesis y que servirán de ayuda para futuros trabajos sobre este tema. Se incluyen además seis Anexos sobre puntos considerados de importancia y la Bibliografía utilizada, lo cual servirá también como fuente de información a las personas interesadas en el tema de las Puestas a Tierra.

VII

INDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCION	
CAPITULO I - MECANISMOS DE APARICION DE GRADIENTES PELIGROSOS	
1.1 Corrientes de Falla en Estaciones Transformadoras 1.	12
1.1 Causales de las Corrientes de Falla	12
1.1.2 Aterramiento de Un Sistema de Potencia	15
1.1.3 Estimación de las Corrientes de Falla a Tierra.	19
1.1.4 Gradientes de Potencial Alrededor de una Subestación	21
1.2 Corrientes de Falla en Líneas	23
1.2.1 Tipos de Perturbaciones	23
1.2.2 Fallas por Cortocircuito con Contacto a Tierra	24
1.2.3 Estimación de la Magnitud de las Corrientes de Falla en Líneas de Transmisión	25
1.2.4 Protección de una Línea de Transmisión en Casos de Falla a Tierra	28
1.2.5 Gradientes de Potencial en las Estructuras de las Líneas de Transmisión	31
1.3 Corrientes de Rayo	32
1.3.1 Mecanismos de Impacto de Rayo	32
1.3.2 Parámetros que Afectan el Comportamiento de los Rayos en las Líneas de Transmisión	39
1.3.3 Ondas de Impulso de Rayo	42
1.3.4 Efectos de Dispersión de las Corrientes de Rayo en Una Línea	45
1.4 Estimación de los Niveles de las Corrientes de Dispersión	52
1.4.1 Resistividad y Conductividad del Suelo	52

VIII

	<u>Página</u>	
1.4.2	Parámetros que influyen en la Resistividad del Suelo	53
1.4.3	Influencia del Tipo de Electrodo en la Dispersión de Corriente	58
1.4.4	Evaluación de las Corrientes Eléctricas en el Cuerpo Humano	62
 CAPITULO II – METODOS DE CALCULO DE PUESTAS A TIERRA Y ATERRAMIENTOS 		
2.1	Puestas a Tierra de Líneas	70
2.1.1	Criterios de Diseño	70
2.1.2	Modelos de Aterramientos en Líneas de Transmisión	72
2.1.3	Programas Digitales para el Diseño de Puestas a Tierra en Líneas de Transmisión	77
2.2	Puestas a Tierra de Estaciones Transformadoras	79
2.2.1	Modelo Básico de Puestas a Tierra	79
2.2.2	Métodos Clásicos de Cálculo	79
2.2.3	Método de la IEEE – Std. 80	82
2.2.4	Método para el Uso de Computadora	85
2.3	Puestas a Tierra de Edificaciones Especiales	88
2.3.1	Puestas a Tierra de Centrales Eléctricas	88
2.3.2	Puestas a Tierra de Estaciones de Comunicación	91
2.3.3	Puestas a Tierra de Laboratorios	92
2.3.4	Puestas a Tierra de Instalaciones Industriales	93
2.4	Impedancias Estáticas y Dinámicas	94
2.4.1	Factores que Influyen en la Impedancia Dinámica	95
2.4.2	Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Puestas a Tierra	96
2.4.3	Métodos para el Cálculo de la Impedancia Dinámica	97

	<u>Página</u>
2.4.4 Resultados de Investigaciones Experimentales	101
 CAPITULO III - MEDICION Y ANALISIS DE PARAMETROS ASOCIADOS	
3.1 Resistividad del Suelo	109
3.1.1 Métodos de Medición	109
3.1.2 Estructura Equivalente del Suelo	114
3.1.3 Interpretación de las Mediciones de Campo	116
3.1.4 Resultados Experimentales	118
3.2 Resistencia de Puesta a Tierra	123
3.2.1 Métodos Básicos de Medición	123
3.2.2 Aplicación del Método de la Caída de Potencial	126
3.2.3 Modalidades del Método de Caída de Potencial	131
3.2.4 Resultados Experimentales	135
3.3 Perfil de Potencial y Tensiones de Toque y Paso	142
3.3.1 Método de Medición del Perfil de Potencial	142
3.3.2 Método de Medición de las Tensiones de Toque y Paso	143
3.3.3 Resultados Experimentales	145
3.4 Corrientes Inducidas en Lazos Cerrados	147
3.4.1 Corriente Inducida en un Contorno Rectangular	147
3.4.2 Lazos Cerrados en Subestaciones y Líneas de Transmisión	150
3.4.3 Modelo de Cálculo para un Caso Tipo	152
3.4.4 Resultados Experimentales	154
 CAPITULO IV - INTRODUCCION DE CORRECCIONES Y MODALIDADES DE MANTENIMIENTO	
4.1 Resistencia de Puesta a Tierra de Líneas	160
4.1.1 Sistema de Contrapesos	160

	<u>Página</u>
4.1.2 Sistema de Jabalinas Profundas	161
4.1.3 Pozos Tubulares con Rellenos Especiales	163
4.1.4 Tratamiento Químico del Terreno	165
4.2 Resistencia de Puesta a Tierra de Estaciones Transformadoras	167
4.2.1 Aumento de las Dimensiones de la Malla de Puesta a Tierra	167
4.2.2 Disminución del Espaciamiento de los Conductores de la Malla	168
4.2.3 Empleo de una Capa Superficial de Alta Resistividad	168
4.2.4 Interconexión con Otros Sistemas de Puesta a Tierra	168
4.2.5 Limitación de la Corriente de Falla	169
4.3 Resistencia de Puesta a Tierra en Edificaciones Especiales	169
4.3.1 Humedecimiento Permanente del Sistema de Puesta a Tierra	169
4.3.2 Sistemas de Puesta a Tierra Periféricos	170
4.4 Directrices para Mantenimiento	170
4.4.1 Objetivo	170
4.4.2 Procedimiento para el Mantenimiento	171

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

INTRODUCCION

Las técnicas de concepción e instalación de Sistemas de Puesta a Tierra para dispersión de corrientes y control de gradientes de potencial en las áreas utilizadas por infraestructura eléctrica han sufrido una gran evolución en los últimos diez años, con adopción de los métodos de Geofísica de exploraciones profundas a la evaluación de los parámetros de Resistividad Específica de los estratos utilizables del suelo; no obstante, aun quedan aspectos de tecnología de instrumentación y mediciones, aparte la preparación de los suelos y la selección de la geometría y características de los electrodos, de modo que los aterramientos eléctricos cumplan con los objetivos previstos y aun evolucionen hacia fines de protección contra corrosión en los apoyos de las estructuras.

El trabajo que hemos dirigido en la presente Tesis representa un examen general de las técnicas actualizadas de aterramientos eléctricos, y contribuye en este permanente estudio, a una mejor comprensión y utilización de las Puestas a Tierra en Líneas y Subestaciones de Alta Tensión, enfatizando en la práctica de las mediciones de campo y la cabal utilización del instrumental, del mismo modo que recoge la experiencia recientemente volcada en el trabajo de corrección y mantenimientos a lo largo de más de 500 km de Líneas de 220 kV y 8 grandes Subestaciones de Alta Tensión.

Ing. Justo YANQUE MONTUFAR
PROFESOR - ASESOR

CAPITULO

MECANISMOS DE APARICION DE GRADIENTES PELIGROSOS

Bajo condiciones de corrientes provenientes de fallas o descargas atmosféricas, el flujo de corriente a tierra da lugar a la formación de gradientes peligrosos, ya sea dentro o en los alrededores de las Subestaciones, estructuras de las Líneas de Transmisión u otras edificaciones propias de los Sistemas Eléctricos.

Una manera simple de definir los gradientes de potencial es considerándolos como la derivada del potencial con respecto a la distancia. Estos gradientes son significativos, por cuanto de ellos depende la tensión que se pueda obtener entre dos puntos de la superficie del terreno, como por ejemplo las tensiones de toque y paso, o los potenciales transferidos.

1.1 CORRIENTES DE FALLA EN ESTACIONES TRANSFORMADORAS

1.1.1 Causales de Las Corrientes de Falla

Los causales de las corrientes de falla son diversos, siendo estos en orden de importancia y a la frecuencia con que se presentan, los siguientes:

1.1.1.1 Descargas Atmosféricas

Las descargas atmosféricas que son uno de los mayores causales de

las fallas y deterioro de las líneas aéreas, también inciden en Subestaciones u otras edificaciones, aún en áreas de moderada actividad de tormentas.

Los impactos de rayo más problemáticos son los directos, particularmente para Subestaciones de Distribución que no están equipadas con cables de guarda. Sin embargo, existen evidencias que sugieren que el evento de impacto de rayo indirecto, a pesar de presentar menor magnitud que el impacto directo, puede llegar a ser un significativo problema debido a su alta frecuencia de ocurrencia (1).

Un análisis más amplio de las descargas atmosféricas se hará en el Título 2.3.

1.1.1.2 Reducción del Aislamiento Externo

Este fenómeno es debido principalmente al efecto de la contaminación presente en el medio ambiente, el cual tendrá repercusiones variadas en los aislamientos, dependiendo del lugar en que se encuentre la Subestación o de la zona por la cual atraviesa una Línea de Transmisión. Así, se puede decir que en las zonas de Selva y Sierra, no debe haber una gran preocupación por este fenómeno, debido al alto grado de precipitación existente, lo que permite limpiar, diluir y desagregar la película de ensuciamiento conductiva que se forma en los aislamientos (2).

El problema de contaminación debe ser tomado más en cuenta en lugares de la Región Costera, caracterizados por la presencia de zonas de fuerte humedad del aire, desiertos con movimiento constante de arena, zonas industriales y agrícolas, donde van a existir elementos contaminantes que se van a depositar en la superficie de los aisladores.

1.1.1.3 Actos de Vandalismo

Este fenómeno se ha hecho muy frecuente en diferentes latitudes

especialmente en los últimos años, en que las líneas eléctricas sufren la destrucción de sus soportes, los cuales al caer van a dar lugar al contacto de una o más fases de la línea con el terreno, provocando de esta manera fallas a tierra.

Dentro de los actos vandálicos también se deben considerar la degradación de los aisladores, causados por el impacto de piedras o proyectiles de caza; lo cual va a aumentar la probabilidad de una falla a tierra.

1.1.1.4 Sobretensiones de Maniobra

Estos problemas se presentan en sistemas de alta tensión, generalmente a partir de 60 kV, o también en redes de menor tensión con fuertes cargas inductivas o bancos de capacitores y son ocasionados por los cambios de configuración normal o accidental de la red de alta tensión, a través de la apertura o cierre de los interruptores del sistema.

1.1.1.5 Contacto Accidental a Tierra de las Fases del Sistema

Se producen con mayor frecuencia en niveles de baja tensión 10 kV o menos, en donde el Personal de Mantenimiento, debido al requerimiento de su trabajo, se encuentra próximo a tener un contacto accidental ya sea con una, dos o las tres fases de la línea o barra en que se está trabajando. El contacto con las fases lo puede hacer en forma franca o a través de instrumentos o herramientas metálicas usados en el mantenimiento.

1.1.1.6 Acortamiento de la Línea de Fuga del Aislamiento

Esta contingencia se origina principalmente durante el proceso de lavado bajo tensión del mantenimiento preventivo que se aplica normalmente al aislamiento externo.

1.1.1.7 Reducción de los Intervalos de Guarda

Debido a la presencia de aves o elementos extraños (cometas de juguete); en este caso, también se debe considerar el efecto producido por la construcción no planificada de viviendas, el crecimiento de árboles o el tráfico de vehículos elevados cerca de las instalaciones eléctricas.

1.1.1.8 Rotura de Conductores

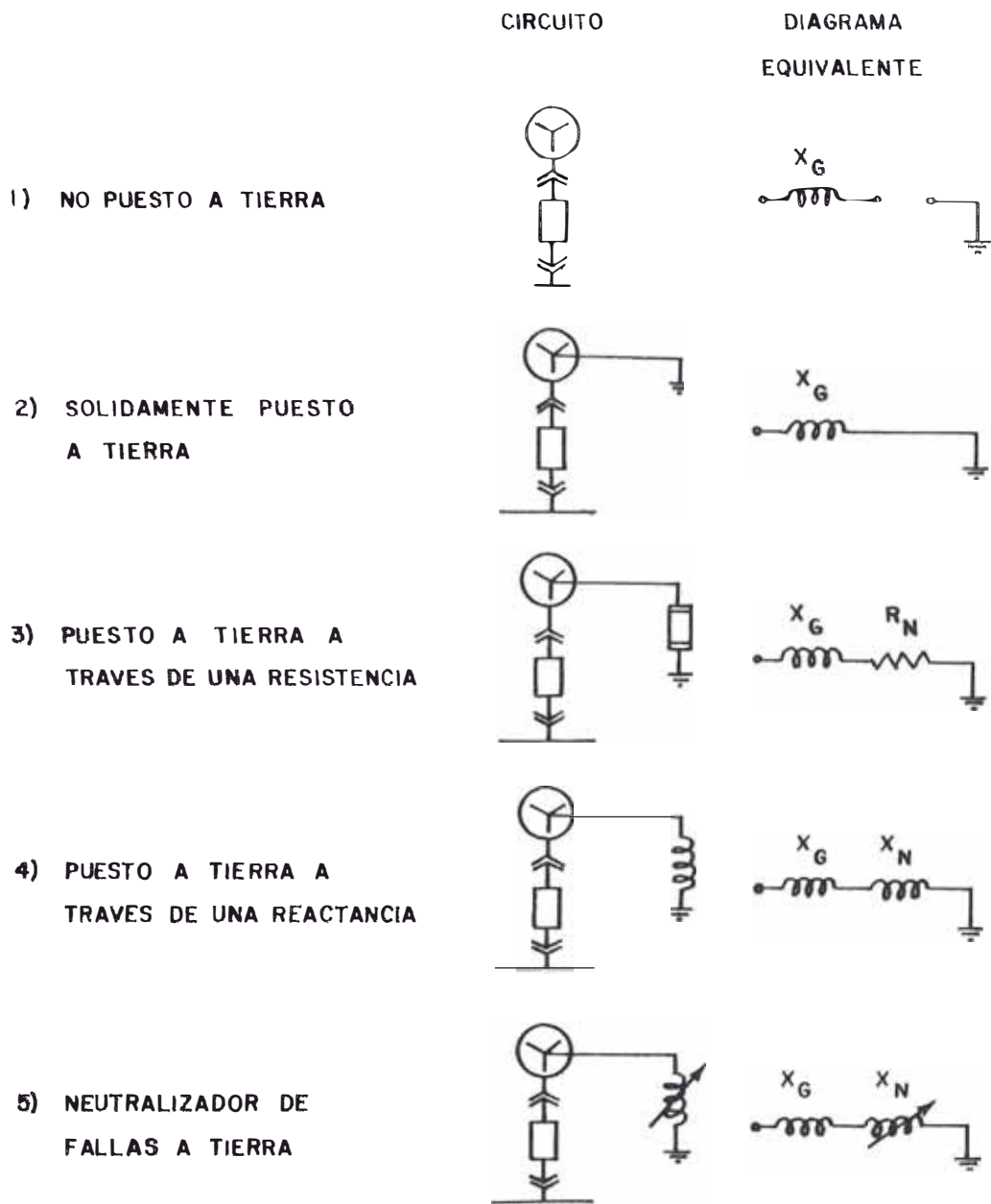
Este fenómeno no es muy frecuente pero debe ser tomado en cuenta debido a la elevada contaminación existente en la zona costera, que va a ocasionar corrosión galvánica entre el conductor y la mordaza, con la consecuente caída del mismo.

1.1.2 Aterramiento de Un Sistema de Potencia

La necesidad de poner a tierra o no un Sistema Eléctrico es un problema que se presenta muy frecuentemente, al momento de hacer el diseño de una Obra Eléctrica. Varios son los factores que influyen para la toma de una decisión final y esta debe ser adoptada luego de un estudio exhaustivo y minucioso de las ventajas y peligros que acarrear cada una de las alternativas (Figura 1).

Es evidente que un sistema con neutro aislado de tierra ofrece un mejor servicio de continuidad, que uno puesto a tierra, debido a que una falla monofásica a tierra no causa una discontinuidad inmediata del circuito fallado; sin embargo, una segunda falla a tierra en otra fase, de otro circuito diferente al original, causaría una falla bifásica con un gran flujo de corriente de cortocircuito, determinando la avería de ambos circuitos fallados.

Por lo tanto, el factor primordial a considerar para seleccionar un sistema puesto a tierra o no, es la calidad de mantenimiento eléctrico disponible. Si se asegura un buen mantenimiento a un sistema aislado, cual



X_G : Reactancia del Generador o Transformador usado para la puesta a tierra

X_N : Reactancia del reactor de puesta a tierra

R_N : Resistencia de puesta a tierra

Figura 1.- Circuitos y diagramas equivalentes para un sistema no puesto a tierra y varios tipos de puesta a tierra del sistema neutro

quier falla a tierra es rápidamente localizada y corregida; contrariamente, muchos sistemas en los cuales su servicio de mantenimiento no es tan eficiente, se inclinan por la utilización de un sistema con neutro puesto a tierra, dando de esta forma mejor continuidad del servicio que es un sistema aislado mal servido (3).

Para el caso de sistemas de Transporte de Potencia a Altas Tensiones se adopta la modalidad de puesta a tierra del neutro como norma general.

1.1.2.1 Neutro Sólidamente Puesto a Tierra.

Cuando se habla de este tipo de aterramientos, nos referimos a la conexión del neutro de un generador o transformador, directamente a la malla de tierra de la Subestación, es decir que no se ha colocado una impedancia de puesta a tierra en serie, en forma intencional. Esto no quiere decir que la impedancia del circuito neutro sea cero, ya que siempre va a existir la reactancia del generador o transformador puesto a tierra.

Si la reactancia del generador o transformador es demasiado grande con respecto a la reactancia total del sistema, los objetivos buscados en el aterramiento, principalmente dispersión de sobrevoltajes transitorios podrían no ser obtenidos. Por lo tanto, es necesario determinar el grado de aterramiento requerido en el sistema (3).

1.1.2.2 Aterramiento a Través de Una Resistencia

En este método de aterramiento, el neutro es conectado a tierra a través de una o más resistencias, pudiendo ser a la vez de dos clases; mediante una resistencia alta o una resistencia baja, dependiendo de la magnitud de la corriente a tierra permitida. El método que utiliza una alta resistencia generalmente no requiere de una apertura inmediata de falla a tierra, dado que la corriente de falla a tierra es limitada a un nivel muy bajo. Este nivel bajo, generalmente del orden de 5 amperios,

debe ser al menos igual a la corriente de carga de la capacitancia del sistema. El esquema de protección asociado con el aterramiento a través de una resistencia alta es generalmente detección y alarma en vez de un disparo inmediato.

El método que utiliza baja resistencia tiene la ventaja de una inmediata y selectiva apertura del circuito fallado a tierra, pero requiere que la mínima corriente de falla a tierra sea lo suficientemente grande (generalmente 400 Amp. o más), para posibilitar la actuación del relé de tierra utilizado (3).

1.1.2.3 Aterramiento a Través de Una Reactancia

Este método trata del caso en que el neutro del sistema es puesto a tierra a través de un reactor (bobina). En un sistema con aterramiento a través de una reactancia, la corriente de falla disipada debería ser al menos 25 por ciento y preferiblemente hasta el 60 por ciento de la corriente de falla trifásica, para prevenir sobrevoltajes transitorios serios. En la práctica este tipo de aterramiento no es utilizado y tan solo se le considera en el caso de poner a tierra el neutro de un generador a través de reactores de valores bajos, los cuales van a limitar la corriente de falla a tierra a valores no mayores que la corriente de falla trifásica del generador (3).

1.1.2.4 Aterramiento a Través de un Neutralizador de Fallas a Tierra (Bobina de Peterson)

Un neutralizador de fallas a tierra es un reactor conectado entre el neutro de un sistema y tierra, teniendo un valor de reactancia relativamente alto y especialmente seleccionado para limitar el valor de las corrientes a tierra.

Este tipo de aterramiento es utilizado cuando no se desea abrir un circuito ante la ocurrencia de una falla y, a la vez estar habilitado

para la localización del alimentador fallado. Una de las características de este tipo de aterramiento, es que debe tenerse cuidado en mantener el neutralizador sintonizado con la capacitancia del sistema para minimizar el desarrollo de sobrevoltajes transitorios. Así, cuando ciertas secciones del sistema son puestas o sacadas de servicio, es necesario ajustar la reactancia del neutro, a través del cambio del tap del neutralizador.

1.1.2.5 Aterramiento a Través de Otros Puntos Diferentes al Punto Neutro

En algunos casos, los sistemas mas de baja tensión (600 V. o me-nos) son puestos a tierra en algún punto diferente al neutro del sistema. Es to se hace para obtener un sistema puesto a tierra, donde existen transfor madores conectados en delta, los cuales no tienen un punto neutro defini do. Existen dos métodos de rara aplicación, que pueden ser utilizados en estos casos, el primero utiliza el aterramiento a través de una esquina de la conexión delta y el segundo método utiliza el aterramiento de una de las fases del sistema delta en su punto medio. Ambos métodos no proveen todas las ventajas de un sistema con aterramiento a través de su punto neutro (3).

1.1.3 Estimación de las Corrientes de Falla a Tierra

Cuando se hace el planeamiento y diseño de un proyecto eléc trico, llámese subestaciones, líneas de transmisión, etc., es de suma importancia el conocimiento de los niveles de magnitud de las corrientes de fa lla a tierra, los que van a ser utilizados en diversos procedimientos de cálculo, siendo uno de ellos el diseño del sistema de puesta a tierra.

El cálculo de estas corrientes puede hacerse en forma manual o con el uso de calculadoras no muy sofisticadas para el caso de sistemas pequeños o aislados; pero cuando se trata de sistemas mucho más complicados y de mayores dimensiones, el procedimiento de cálculo debe hacerse

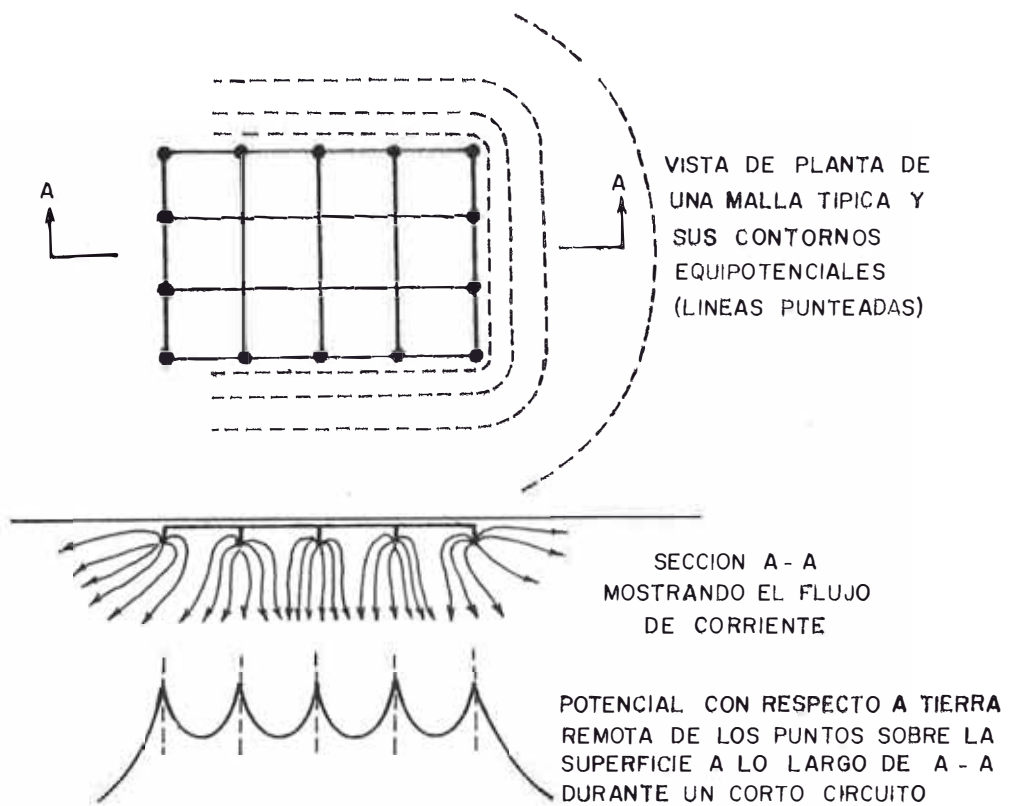


Figura 2.- Corrientes y Potenciales dentro y alrededor del área de la malla de puesta a tierra

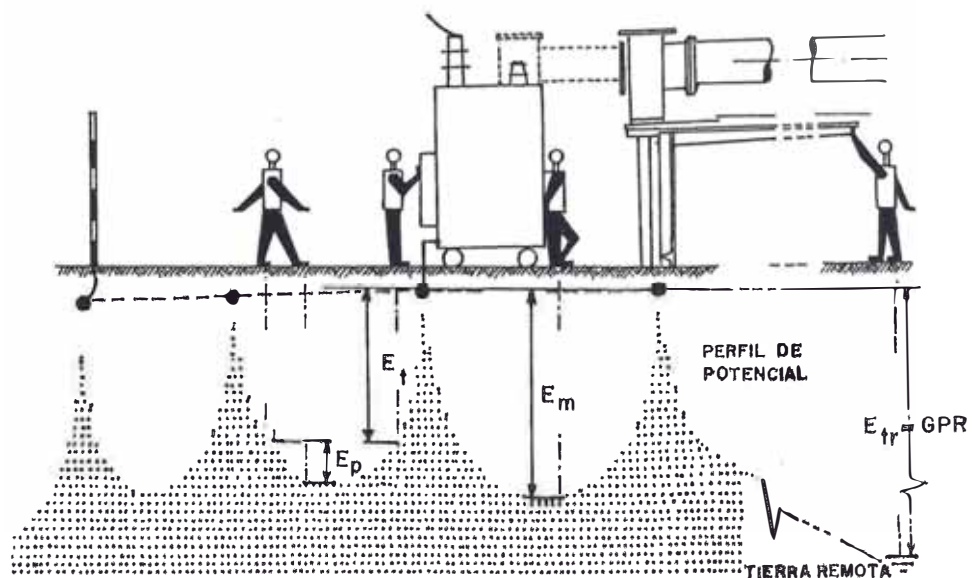


Figura 3.- Situaciones Básicas de Potenciales Peligrosos durante una falla a tierra

con el uso de computadoras, existiendo programas especialmente desarrollados, a los cuales tan solo queda alimentarlos con los datos del sistema analizado. Entre estos programas se pueden citar al CCRJX de origen rumano y el desarrollado en nuestro medio (4) los cuales son utilizados para el análisis de los sistemas de potencia. Ambos tienen sus ventajas y desventajas uno con respecto del otro, por lo que es necesario realizar un análisis de sus características cuando se desee hacer uso de alguno de estos programas.

En el ANEXO I, a manera de ejemplo se dan a conocer los valores de las corrientes de cortocircuito en las barras del Sistema Interconectado de ELECTROPERU S.A. previstos para el año 1985, tabulados según tres criterios diferentes: En la Tabla de dicho Anexo, se muestran las corrientes de cortocircuito para las principales barras del sistema a un nivel de tensión de 220 kV, en la Tabla 2 para las barras de una Subestación con diferentes niveles de tensión y en la Tabla 3 para las líneas que llegan a una barra donde se ha producido una falla.

Los valores anotados en las Tablas del ANEXO I, han sido calculadas utilizando el programa (4) desarrollado por el Ing. F. Vervloet, aplicado al sistema interconectado peruano Norte Centro.

1.1.4 Gradientes de Potencial Alrededor de una Subestación

Simultáneamente a la ocurrencia de una falla a tierra en una Subestación, el flujo de corriente inyectado al sistema de puesta a tierra va a dar origen a ciertos gradientes de potencial dentro y en los alrededores del área de la malla de puesta a tierra, como se puede ver en la Figura 2; el cálculo preventivo y exacto de estos gradientes resulta dificultoso, debido a la complejidad de la geometría del sistema de puesta a tierra y al conocimiento incompleto de las características del subsuelo; sin embargo existe información importante sobre este tema (5), (6), (7) y (8).

La Figura 3 muestra cuatro situaciones básicas que compromete

ten a una persona durante una falla : La tensión de paso E_p , la tensión de toque E_t , la tensión de malla E_m y el potencial transferido E_{tr} (9).

1.1.4.1 Potencial de Tierra y Elevación del Potencial de la Puesta a Tierra

En condiciones normales, el equipo eléctrico puesto a tierra opera a un potencial de tierra cero, lo que quiere decir que el potencial de un conductor neutro puesto a tierra es igual al de la tierra remota. Durante una falla, la porción de corriente que es disipada en el terreno por el electrodo de puesta a tierra, causa la elevación del potencial de este dispositivo con respecto a la tierra remota. Esta elevación del potencial, proporcional a la magnitud de la corriente disipada y a la resistencia aparente del electrodo es la elevación de potencial de la puesta a tierra del electrodo.

1.1.4.2 Tensión de Paso E_p

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie a un paso de distancia (1 metro), experimentada por una persona puentando esta distancia sin ningún otro contacto que sus pies.

1.1.4.3 Tensión de Toque E_t

Es la diferencia de potencial entre la elevación de potencial de la puesta a tierra y el potencial de la superficie en el lugar donde un hombre se encuentra parado y al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura puesta a tierra.

1.1.4.4 Tensión de Malla E_m

Es el peor valor posible de la tensión de toque a ser encontrada dentro de una malla del reticulado de puesta a tierra, si se está parado cerca o en el centro de la malla.

1.1.4.5 Potencial Transferido E_{tr}

Es un caso de la tensión de toque en un lugar remoto, donde la tensión de choque puede ser aproximada o igual a la elevación de potencial de puesta a tierra del electrodo o reticulado.

1.2 CORRIENTES DE FALLA EN LINEAS

1.2.1 Tipos de Perturbaciones

Tomando en cuenta el tiempo de duración de las perturbaciones (10) se las puede agrupar de la siguiente manera :

1.2.1.1 Perturbaciones Muy Rápidas

Caracterizadas por un tiempo de duración del orden de los microsegundos; son causadas por descargas atmosféricas o durante las operaciones normales de apertura o cierre de interruptores. Una perturbación de este tipo da lugar a una onda que viaja aproximadamente a la velocidad de la luz a lo largo de toda la línea de transmisión, que cuando alcanza sus terminales origina ondas reflejadas, las cuales son de naturaleza peligrosa porque pueden perforar el aislamiento del equipo de alta tensión de la Subestación.

1.2.1.2 Perturbaciones Rápidas

Caracterizadas por un tiempo de duración del orden de los milisegundos. Son causadas por cambios estructurales abruptos y anormales en el sistema de potencia, comunmente llamadas fallas de cortocircuito y se las puede clasificar de la siguiente manera :

- Cortocircuitos de Línea a Tierra
- Cortocircuitos de Dos Líneas a Tierra
- Cortocircuitos de Línea a Línea

- Cortocircuitos Trifásicos

De estos tipos de fallas, los más severos e importantes para ser estudiados son las fallas con contacto a tierra, ya que de ellas depende la máxima elevación de potencial del sistema de puesta a tierra, así como también la magnitud de los gradientes en los alrededores de la puesta a tierra (10).

1.2.1.3 Perturbaciones Lentas

Se caracterizan por tener un orden de duración de los segundos. Son originados por la persistencia de una perturbación tipo cortocircuito, cuando la porción averiada del sistema no ha sido debidamente aislada. Estas perturbaciones pueden degenerar en la salida de sincronismo de las máquinas, ocasionando demoras para el completo restablecimiento del servicio.

1.2.2 Fallas por Cortocircuitos con Contacto a Tierra

El término Falla a Tierra, se refiere especialmente a fallas de una o dos fases en contacto franco con tierra, las fallas trifásicas a tierra por lo general no son consideradas dentro de este grupo, debido a la dificultad de operación de los relés de tierra ante la ocurrencia de este tipo de fallas, a menos que hubiera un suficiente desbalance, capaz de producir una corriente de secuencia cero posible de medición.

Dentro de las fallas con contacto a tierra la más importante, frecuente y con mayor necesidad para ser estudiada es la falla monofásica a tierra. Los motivos son diversos, siendo algunos de estos su gran magnitud y su mayor probabilidad de ocurrencia con respecto a los otros tipos de fallas.

Durante el evento de una falla a tierra, las torres ubicadas cerca al lugar donde se produce la falla, probablemente van a adquirir

altos gradientes de potencial en sus alrededores, representando un serio peligro para las personas y animales que se encuentran presentes en esos lugares en el momento de la falla. En la Figura 4 se muestra la distribución típica de las corrientes de falla para diferentes posiciones de la falla a tierra y diversas configuraciones del sistema eléctrico.

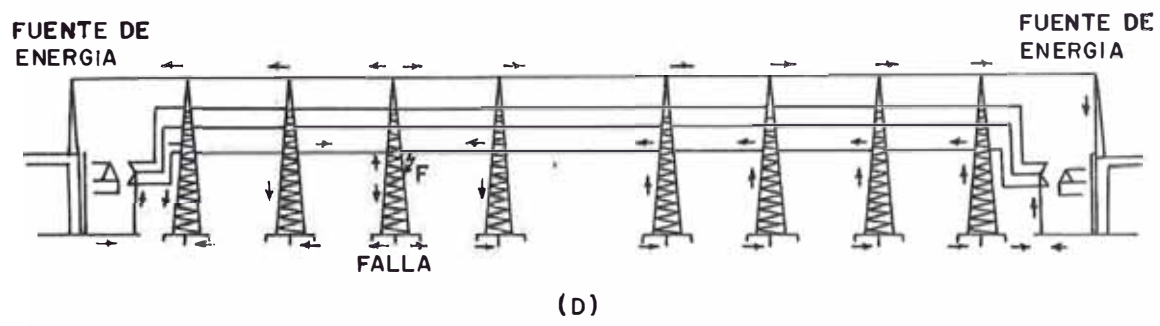
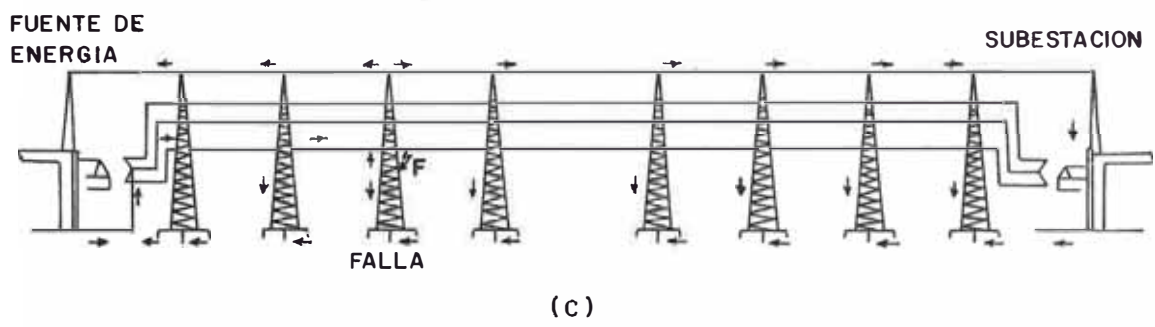
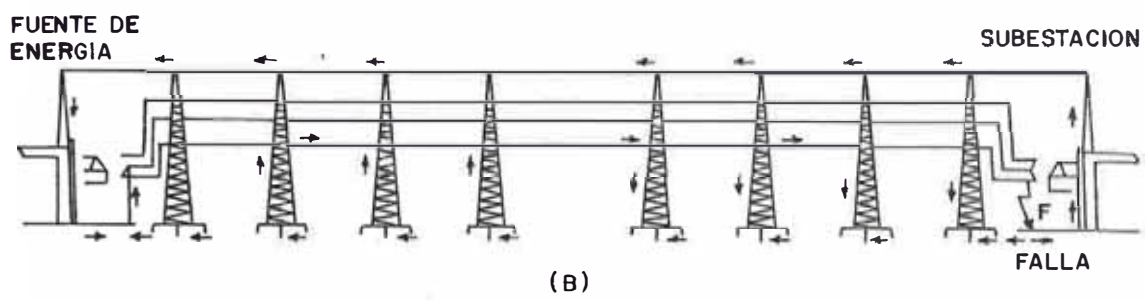
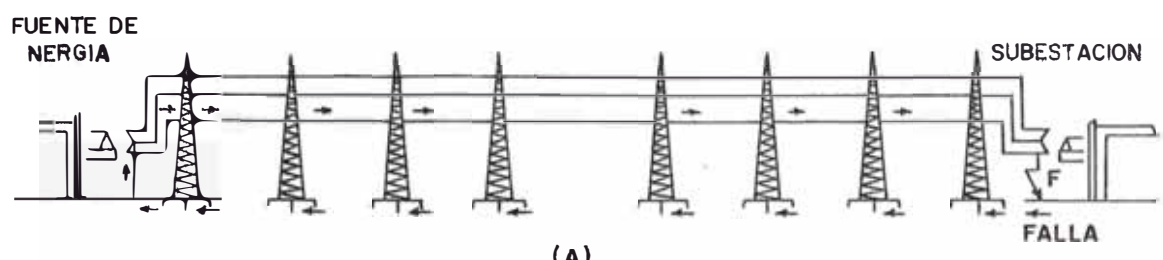
1.2.3 Estimación de la Magnitud de las Corrientes de Falla en Líneas de Transmisión

La magnitud de corriente que va a fluir durante el evento de una falla de **una línea a tierra** en un sistema con neutro puesto a tierra, es usualmente determinada por la impedancia de los aparatos puestos a tierra, la impedancia de las líneas o cables alimentando la falla y la impedancia del camino de retorno a tierra, incluyendo alguna resistencia o reactancia colocadas intencionalmente al realizar la puesta a tierra. Así el valor eficaz (rms) de la corriente de falla a tierra I_f , puede ser determinada en la manera convencional (3) usando la siguiente ecuación :

$$I_f = \frac{3V}{3Z_s + 3Z_f + Z_o + Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

donde :

- I_f : Valor rms de la corriente de falla a tierra, en el instante del inicio de la falla, en amperios.
- V : Tensión de fase a neutro, en voltios
- Z_s : Impedancia de puesta a tierra, de la Subestación o fuente de generación, en ohmios.
- Z_f : Impedancia de falla, en Ohmios
- Z_o : Impedancia de secuencia cero, en ohmios por fase
- Z_1 : Impedancia de secuencia positiva, en ohmios por fase
- Z_2 : Impedancia de secuencia negativa, en ohmios por fase



F: LOCALIZACION DE LA FALLA

CASO	LOCALIZACION DE LA FALLA	CABLE DE GUARDA	NUMERO DE FUENTES DE ENERGIA
A	En la subestación	No	01
B	En la subestación	Si	01
C	Cerca a la fuente de energía	Si	01
D	Cerca a la fuente de energía	Si	02

Figura 4.- Distribución típica de la corriente en caso de una falla monofásica a tierra

Los Valores de Z_0 , Z_1 y Z_2 son tomados analizando el sistema desde el punto de falla.

El Valor Z_s puede ser medido experimentalmente.

La impedancia de falla generalmente está dada tan solo por su componente resistiva, que usualmente está conformada por la suma de la resistencia de arco y la resistencia entre la línea y tierra. La resistencia de arco varía con la corriente de falla y aumenta con el tiempo, ya que la longitud del arco también aumenta con el tiempo; sin embargo su magnitud es tan pequeña frente a la impedancia de la línea y tan solo debe ser considerada cuando se trata de una línea corta.

La resistencia entre la línea y tierra para líneas sin cable de guarda es igual a la resistencia de puesta a tierra del soporte afectado, pero cuando las líneas de transmisión tienen un cable de guarda de gran conductividad, la resistencia entre la línea y la tierra es solamente un porcentaje de la resistencia de puesta a tierra de uno de los soportes o torres, debido a que la corriente es dividida entre un gran número de torres. Como en el caso de la resistencia de arco, la resistencia entre la línea y tierra en tales casos resulta insignificante frente a la impedancia de la sección protegida.

Es por esto que para propósitos prácticos, el efecto de las impedancias de falla y de puestas a tierra de la Subestación o fuentes de generación pueden ser consideradas despreciables al momento de hacer el cálculo de la corriente de falla, obteniéndose de ésta manera una expresión más simplificada dada por :

$$I_f = \frac{3V}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad \text{Amperios} \quad (2)$$

Para sistemas más grandes, el cálculo de la corriente de falla en un cierto punto de la Línea de Transmisión, es por lo general más complicado, siendo necesario el uso de la computadora como se ha visto

en el caso de las corrientes de falla en las barras de las Subestaciones en el Subtítulo 1.1.3. Para este caso de fallas en líneas de transmisión, es necesario crear una barra ficticia en el lugar donde se desea simular la falla.

1.2.4 Protección de Una Línea de Transmisión en Casos de Falla a Tierra

Con el fin de dar mayor seguridad y eficiencia del servicio eléctrico al cliente, los sistemas de potencia deben ser capaces de dejar inmediatamente cualquier perturbación que se produzca dentro de ellos. Por lo tanto es necesario e importante una adecuada protección a través de relés de tierra de todos los componentes del sistema y muy en especial, de la Línea de Transmisión, para obtener de esta manera el alto grado de servicio que es requerido actualmente. A continuación se enumerarán algunos de los dispositivos utilizados normalmente para la protección de una línea de transmisión ante el evento de una falla a tierra.

1.2.4.1 Relés de Distancia (Código 21)

Desde hace mucho tiempo, estos relés en cualquiera de sus tipos (impedancia, admitancia, resistencia o reactancia) han sido utilizados para detectar las fallas a tierra. El principal problema de este tipo de dispositivos es que no son capaces de detectar fallas a muy altas resistencias de falla, tales como 50 a 100 Ohmios o más. Incluso relés de distancia dotados especialmente con características como las del mho círculo o del polígono, tienen sus propias restricciones y son eficientes tan solo para ciertas condiciones del sistema al cual se va a proteger, no representando la mejor solución para el problema presentado.

1.2.4.2 Relé de Distancia Tipo Impedancia (Código 21)

Dentro de los diferentes tipos de relés de distancia el más conocido y normalmente usado es el de impedancia (11). Estos relés sen

san una relación de voltaje a corriente y operan cuando la impedancia medida es menor que su valor presente, indicando una falla en la línea que está protegiendo. Sus características de discriminación son muy buenas, capaces de diferenciar una corriente de falla de una corriente de carga normal y son direccionales. Usualmente se utilizan tres relés de impedancia para la protección por zonas de una línea de transmisión, como se puede observar en la Figura 5, que muestra la zona protegida por cada uno de los relés, así como también el tiempo en que actúan.

1.2.4.3 Relé de Sobrecorriente (Código 51)

Existe una gran variedad de esta clase de relés, dependiendo principalmente del tiempo de inicio de operación. Los más conocidos son los relés de sobrecorriente instantáneos y los relés de sobrecorriente de tiempo inverso, los primeros sienten la cantidad de corriente presente y actúan sin un retraso intencional, iniciando su actuación entre los 4 y 16 milisegundos; en cambio los segundos tienen como principal característica que su tiempo de operación varía inversamente con la magnitud de la corriente de falla, pudiendo operar entre 4 y 2000 milisegundos.

1.2.4.4 Relé de Falla a Tierra Direccional Tipo PPX401 (Código 67)

Con motivo de mejorar la protección de las líneas de transmisión, ante el evento de fallas a tierra con resistencias de falla muy elevadas, la Brown Boveri viene equipando sus esquemas de protección de falla a tierra por comparación direccional con un relé estático altamente sensitivo Tipo PPX401 (12). Esta protección es normalmente provista como elemento auxiliar para ciertos tipos de protección a distancia; pero también se lo puede encontrar con un dispositivo de protección independiente (LP) con su propia fuente y unidad de disparo. La dirección medida por el relé es la perteneciente a la corriente de secuencia cero y las magnitudes usadas como referencia son también la tensión y corriente de secuencia cero del neutro del transformador.

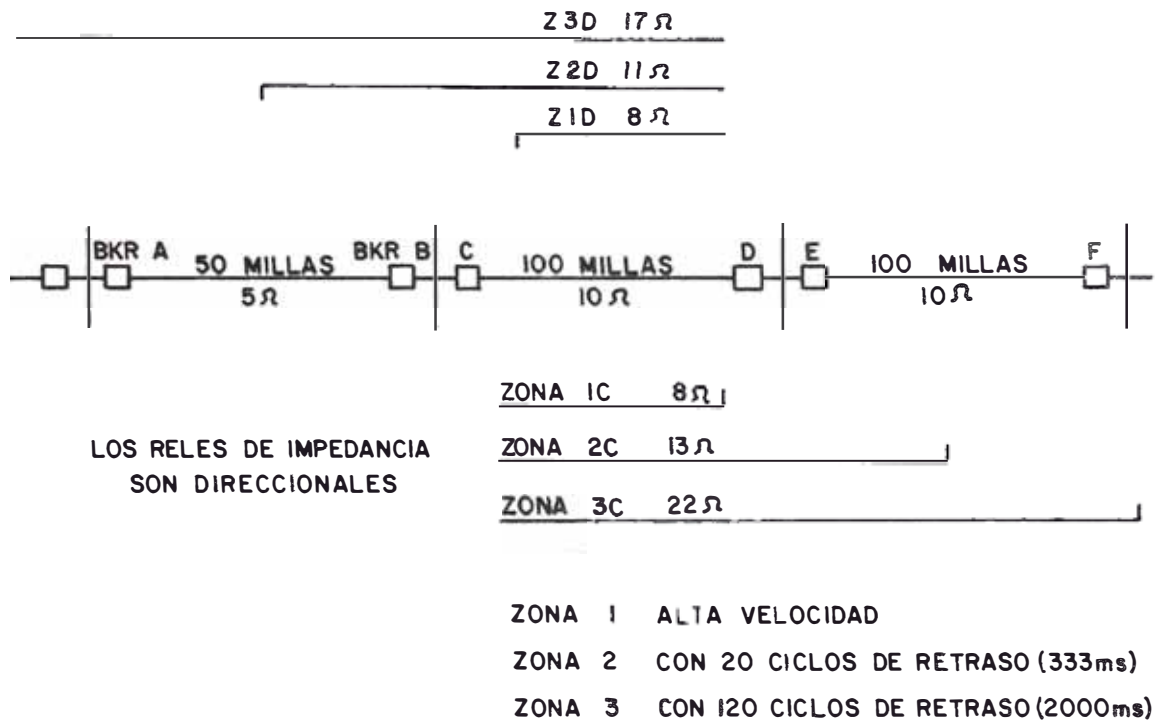


Figura 5.- Alcance de las tres zonas típicas de un relé de distancia tipo impedancia

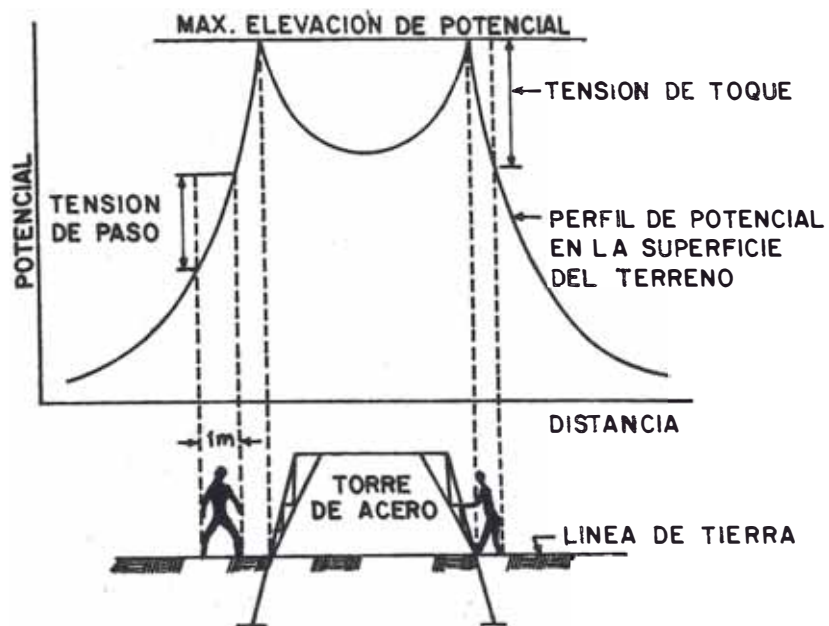


Figura 6.- Perfil de Potencial alrededor de una estructura

Las ventajas de la protección de fallas a tierra por comparación direccional, sobre la protección que utiliza relés de potencia de secuencia cero con características de tiempo inverso resultan del hecho que el relé direccional es más sensitivo y que el tiempo de actuación es definido y no hay problemas con la graduación del tiempo; en cambio para el segundo caso, si las resistencias de falla son grandes, el voltaje y corriente de secuencia cero son ambos pequeños y la sensibilidad del relé de Potencia de Secuencia Cero resulta inadecuada.

1.2.5 Gradientes de Potencial en las Estructuras de Las Líneas de Transmisión

Durante el evento de una falla a tierra, el mayor peligro se presenta donde el potencial de la torre alcanza su mayor valor. Por lo tanto es importante hacer un estudio del máximo voltaje que va a aparecer en la torre más cercana al lugar de la falla o en todo caso en la torre donde se produce esta eventualidad.

Los factores más importantes que van a influenciar en la magnitud de los gradientes de potencial en los alrededores de una torre afectada por una falla son los siguientes (13) :

- a) Magnitud de las corrientes de falla
- b) Localización de la falla con respecto a los terminales de la Línea
- c) Resistencia de puesta a tierra de la subestación en los terminales de la Línea
- d) Arreglo del conductor en la torre y localización de la fase fallada
- e) Promedio de la resistencia de puesta a tierra de la Línea y resistencia de puesta a tierra de la torre más cercana a la falla
- f) Número, material y dimensiones del cable de guarda
- g) Número, material y dimensiones de los contrapesos

h) Resistividad del Suelo

Dentro de estos factores lo más importantes en el cálculo de los potenciales de tierra en la base de la torre son el sistema de aterramiento, la resistividad del terreno y la distribución de la corriente de falla entre la torre y el cable de guarda.

La ilustración del perfil de potencial en la superficie del terreno alrededor de la base de la torre, es muy importante ya que nos permite visualizar los lugares donde se van a producir los mayores gradientes de potencial y por lo tanto las mayores tensiones de toque y paso, tal como se observa en la Figura 6 donde se puede notar que los potenciales alcanzan su máximo valor en la base de la torre y decaen rápidamente al alejarse de ella.

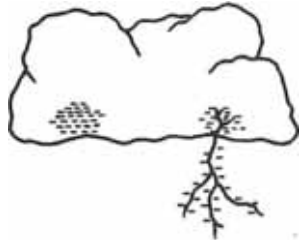
1.3 CORRIENTES DE RAYO

Una de las causas más frecuentes de las salidas de servicio de los Sistemas Eléctricos, son las descargas atmosféricas, motivo por el cual conviene tener un conocimiento lo más amplio posible del origen de estos fenómenos, así como también de los efectos sobre las instalaciones eléctricas.

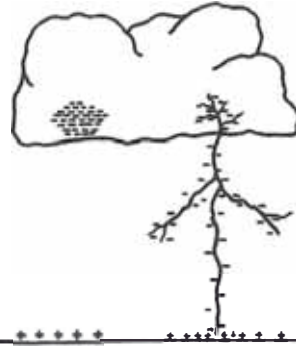
1.3.1 Mecanismos de Impacto de Rayo

1.3.1.1 Descripción

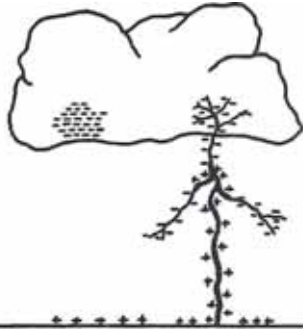
Antes del inicio de una descarga atmosférica, los gradientes eléctricos dentro de la nube tienden a ser mucho más grandes que en la tierra, donde los gradientes nunca exceden de 100 voltios por centímetro; por lo tanto la descarga tiende a ser iniciada en la nube, en lugar que en la tierra, lo cual es ratificado por los resultados de un gran número de registros fotográficos (14) hechos por Schonland. Sin embargo, existen ciertas evidencias que llevan a pensar que en algunos casos, la iniciación de



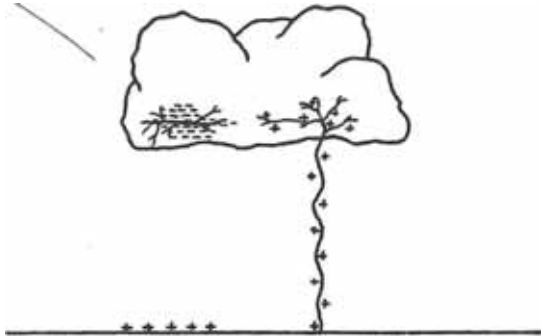
(a) La carga se encuentra concentrada en la nube; el flujo piloto y el líder escalonado se propagan a tierra. En el exterior, las ramificaciones de la descarga también se dirigen a tierra. La carga se distribuye en la parte inferior de la nube.



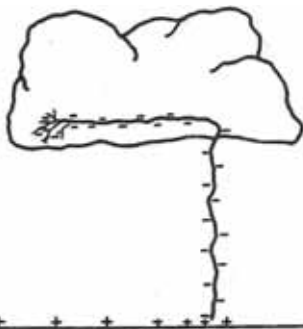
(b) El desarrollo de (a) casi ha sido terminada y el flujo piloto está a punto de tocar la tierra.



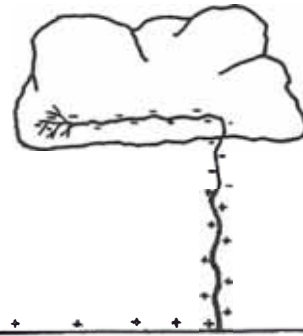
(c) Fuerte descarga iniciada desde un punto del suelo. La parte inferior de la nube cargada negativamente, se descarga a tierra.



(d) El primer centro de carga ha sido descargado completamente. Aparición de cargas disruptivas dentro de la nube, entre los centros cargados eléctricamente.



(e) Proceso de descarga entre los dos centros cargados eléctricamente. Un líder rápido se propaga a tierra a través del canal original y está a punto de tocar el suelo. Se inicia el descenso de la carga negativa, que se distribuye a lo largo del canal de descarga.



(f) Fuerte descarga de retorno iniciada desde un punto del suelo y consecuente descenso a tierra de la carga negativa concentrada debajo de la nube.

Figura 7.- Distribución de la carga en varios estados de una descarga de rayo

las descargas se producen en la tierra y no en las nubes (14), como lo ha ce conocer Mc Eachron basado en sus observaciones para edificios muy al tos, en las cuales ha mostrado que el destello inicial de la descarga de un rayo, generalmente emerge hacía arriba del edificio. Lo anotado última mente, no ha podido ser probado que ocurra para una línea de transmisión; por lo que se sugiere que para el tipo de descargas relacionadas con los sistemas eléctricos, la descarga inicial puede ser asumida empezando en la nube y no en la tierra. La Figura 7 muestra un diagrama de la distribu ción de carga en varios estados de la descarga atmosférica.

Una descarga atmosférica consta de dos fases bien caracterizadas marcadas, por los líderes iniciales y la descarga de retorno. Este fe nómeno que generalmente aparece al ojo humano como un simple destello, está en realidad compuesto de un cierto número de descargas separadas que viajan por el mismo camino, donde cada destello separado empieza co mo un líder descendente de la nube. Cuando el líder delantero toca la tierra, se produce una intensa descarga disruptiva, consistente en una silue ta de intensa luminosidad viajando de la tierra a la nube.

Las corrientes asociadas con los flujos pilotos de los líderes iniciales son pequeñas, la mayoría del orden de sólo algunos amperios, con una luminosidad muy baja, tan baja que no es posible ser registrada en placas fotográficas, siendo deducida su existencia por inferencia y por un análisis del mecanismo de descargas atmosféricas. Por el contrario la descarga de retorno, luego que el líder alcanza la tierra, es extremada mente brillante y va asociada a las elevadas corrientes propias de las des cargas atmosféricas entre 1,000 y 220,000 amperios.

El primero de estos procesos es lento, requiriendo un tiempo del orden de 10,000 microsegundos; mientras que el segundo es relativa mente rápido, requiriendo sólo de 50 a 100 microsegundos. La se cuencia completa de una descarga atmosférica de acuerdo con Schonland es mostrada en la Figura 8.

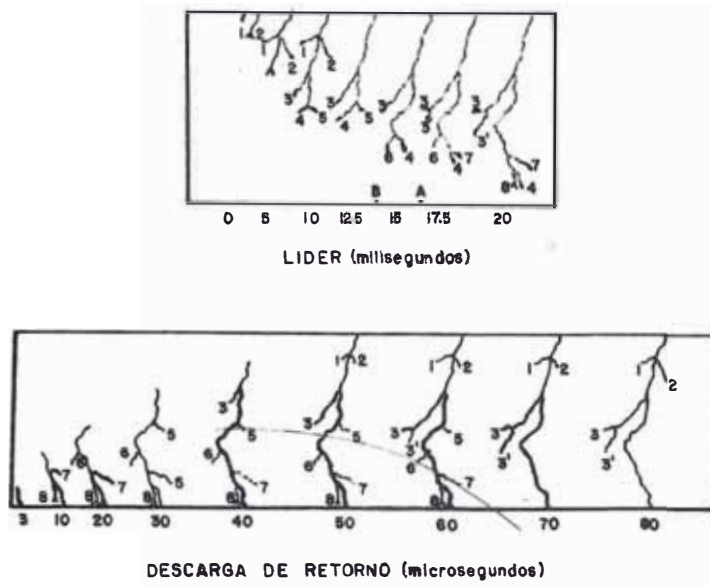


Figura 8.- Mecanismo de descarga de un impacto de rayo, según Schonland

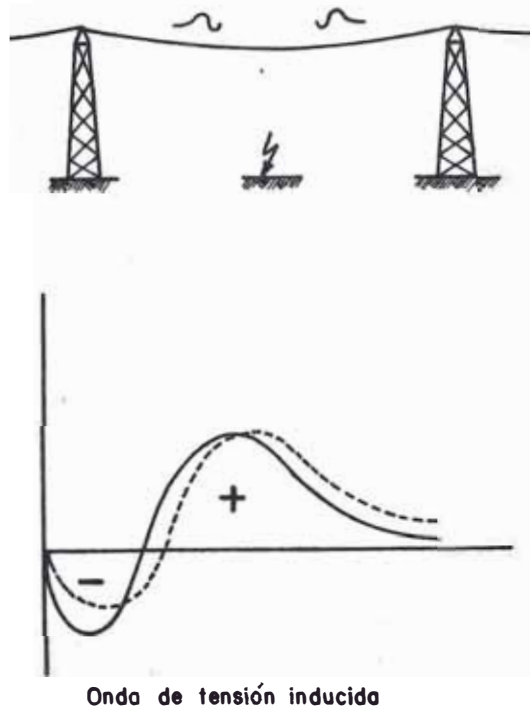


Figura 9.- Mecanismo de impacto de un rayo indirecto

1.3.1.2 Tipos de Mecanismo de Impacto de Rayo

A) Mecanismo de Impacto de Rayo Indirecto

Este tipo de mecanismos se presentan en las instalaciones eléctricas cuando la descarga cae a tierra en las proximidades de la línea o Subestación, produciendo en todos los conductores efectos de inducción electrostática repartida y efectos electromagnéticos a la velocidad de variación de la corriente con un posible contorno inverso. Esto es debido a la carga inicial de la línea que se ve liberada bruscamente, como consecuencia de la reducción súbita o desaparición del campo eléctrico entre la nube y la tierra. Esta carga tiende a desplazarse en forma de ondas de tensión, pero no significa completamente un fenómeno de onda móvil y su configuración generalmente tiene campo bipolar (15), (Figura 9).

La teoría electrogeométrica indica que un líder, el cual va a causar un rayo indirecto no puede estar más cercano que la distancia crítica de impacto r_c (16), como se observa en la Figura 10.

La r_c considerada usualmente está dada por :

$$r_c = 7.1 I^{0.75} \quad (\text{Brown - Whitehead}) \quad (3)$$

Pero en casos más específicos se debe considerar :

$$r_c = 9.4 I^{0.007} \quad \text{para } I < 30 \text{ KA} \quad (4a)$$

$$r_c = 2 I + 30 \quad \text{para } I \geq 30 \text{ KA} \quad (4b)$$

(Daverniza, Sargent, Limbourn, Choy, Caldevell, Currie, Holcombe, Stillman, Frowd)

B) Mecanismo de Rayo Directo

En este tipo de impactos, el rayo toca directamente ya sea al conductor mismo o en otros casos a las estructuras o al cable de guarda, colocado en las partes más altas de las estructuras de la línea de transmisión para protegerlas contra los rayos directos, actuando como una protección de Faraday. En esta forma la mayor parte de impactos directos

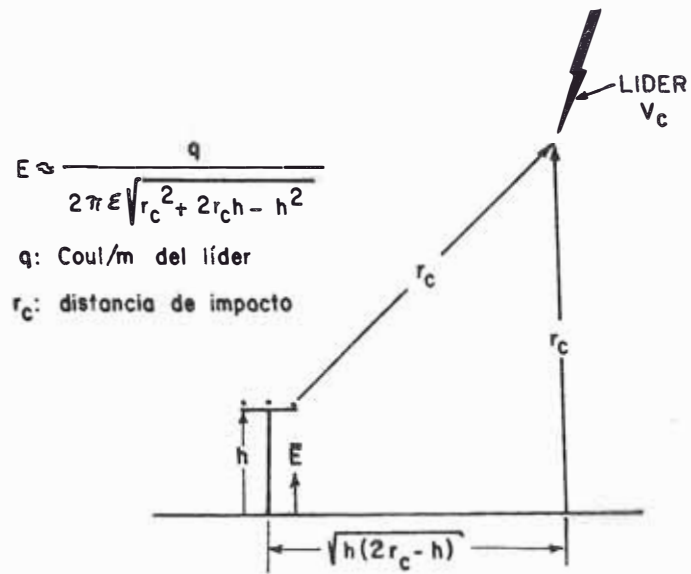


Figura 10.- Distancia crítica de impacto

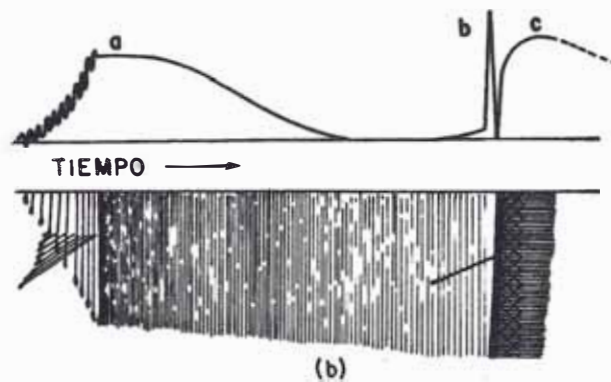
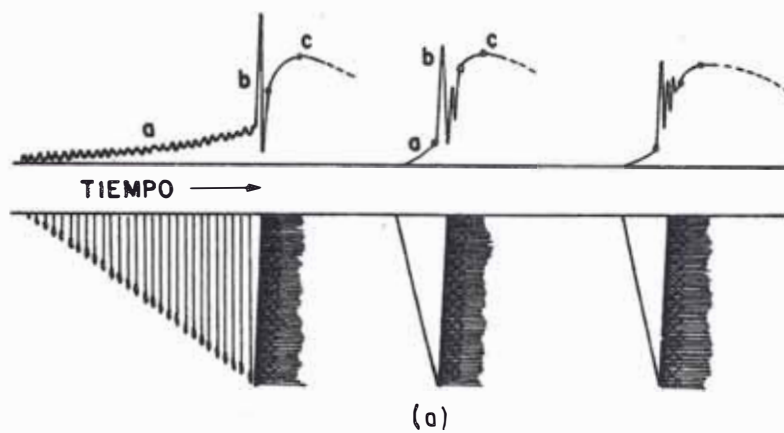


Figura 11.- Relación entre el mecanismo de rayo y los gradientes de tierra, para dos tipos de descargas observadas por Schonland

son recibidos por el cable de guarda y solamente un porcentaje muy reducido podría alcanzar a algún conductor. Para la localización del cable de guarda se utiliza el Modelo Electrogeométrico (16), propuesto por J. W. Brown en su Tesis Doctoral.

Cuando el impacto de rayo cae directamente sobre el conductor, la corriente de rayo inyectada en la línea produce un drástico cambio de estado de las cargas preexistentes, tendiendo a desplazarse en ambas direcciones con el consiguiente cambio del campo eléctrico al engendrarse ondas móviles cuya amplitud de cresta está dada por la expresión:

$$U(t) = \frac{1}{2} I(t) Z_0 \quad \text{Sobretensión transitoria (5)}$$

donde :

- I : Corriente de Rayo
- Z_0 : Impedancia característica del Conductor

La forma inicial de esta sobretensión de corta duración es idéntica a la de la onda de corriente, aunque después se amortigua lentamente durante su recorrido. El acoplamiento electrostático y electromagnético entre conductores permite la inducción de sobretensiones de idéntica forma pero de menor magnitud. El contorneo en una cadena de aisladores puede o no producirse según que la sobretensión sobrepase o no el nivel de aislamiento; en esa forma la onda de tensión que continúa viajando será una onda completa si :

$$I (Z_0 / 2) < \text{Tensión Disruptiva de M} \quad (6a)$$

M : Cadena de Aisladores

o si no una onda cortada si :

$$I (Z_0 / 2) \geq \text{Tensión Disruptiva de M} \quad (6b)$$

En este último caso es cuando se produce contorneo inverso.

Si la descarga, cae sobre la estructura o sobre el cable

de guarda puede dar lugar a una disrupción inversa, debido a la aparición de una sobretensión en los extremos de una cadena de aisladores, ya que tanto el cable de guarda como la estructura proporcionan la vía más rápida de dispersión de la corriente de rayo con la consiguiente modificación del campo eléctrico entre el cable de guarda y los conductores de la línea; la magnitud de tales sobretensiones es difícilmente calculable con precisión y depende de la forma de onda de la corriente y del tiempo de propagación hacia tierra (15).

1.3.1.3 Gradientes de Tierra Durante el Impacto de Rayo

Para un tiempo con clima bueno, el gradiente electrostático en la superficie de la tierra es positivo y con un promedio de un voltio por centímetro. Cuando una nube cargada pasa sobre un lugar determinado, este gradiente primeramente empieza a crecer y luego a medida que la nube continúa pasando va decreciendo, para finalmente hacerse negativo. La magnitud de los gradientes de campo, directamente debajo de las nubes que originan la tormenta, antes que ocurra una descarga se estiman entre 50 y 100 voltios por centímetro.

Schonland, Hodges y Collens han coordinado las fotografías de la Cámara Boys con oscilogramas de rayos catódicos del cambio de gradiente debido a descargas atmosféricas. Estos registros fueron clasificados en dos tipos principales, como se puede observar en la Figura 11, siendo el 65% del tipo mostrado en 11a y el 35% del tipo mostrado en 11b. En esta figura las gráficas superiores muestran los gradientes y las gráficas inferiores los registros fotográficos. La porción "a" es asociada con el descenso del líder, la porción "b" es asociada con la descarga de retorno en el período que se propaga de la tierra a la nube y, la porción "c" con la pequeña magnitud de corriente fluyendo por el canal hacia abajo, después que la descarga de retorno a alcanzado la nube.

1.3.2 Parámetros que Afectan el Comportamiento de Los Rayos en las Líneas de Transmisión

Esta parte se relaciona preferentemente con las líneas de transmisión de doble terna, diseñadas generalmente con criterio económico y en la asunción intuitiva de que hay una menor posibilidad de salida de servicio, si es que se utilizan ambas ternas simultáneamente. Sin embargo, los comportamientos observados indican que la proporción de salidas de servicio de este tipo de líneas provocadas por rayos, es mucho más grande de lo esperado y no es suficiente asumir que su comportamiento referente a las salidas de servicio va a ser aceptable.

Una técnica para predecir la razón de salida de servicio de una línea de transmisión de doble tema ha sido presentada por M. A. Sargent y M. Daverniza (17) quienes lograron hacer investigaciones para mostrar los factores que influyen en la razón de salida de servicio de las líneas de transmisión, los mismos que se tratarán a continuación.

1.3.2.1 Resistencia de Puesta a Tierra de las Estructuras

La reducción de la resistencia de puesta a tierra de las estructuras, es una manera muy efectiva para mejorar el comportamiento de las líneas de transmisión ante el fenómeno de las descargas atmosféricas. Esta aseveración se hace basándose en el conjunto de datos de campo y en los cálculos teóricos hechos por diversos investigadores, los cuales muestran una reducción en la razón de salida de servicio de una línea, cuando se logra mejorar la resistencia de puesta a tierra de las estructuras. Uno de estos estudios fué hecho por Sargent y Daverniza en una línea de 220 kV, de doble terna, quienes lograron una resistencia de puesta a tierra de 10 ohmios, y el resultado fué una reducción del 40% para el total de salidas de servicio y de 25% para las salidas de las dos ternas simultáneamente.

1.3.2.2 Número y Arreglo del Cable de Guarda

La adición de un segundo cable de guarda a una línea, debería mejorar el comportamiento de la línea ante la acción de los rayos, ya

que perfecciona el apantallamiento y acoplamiento para los conductores de fase y disminuye la impedancia presentada a la descarga atmosférica. El efecto de adición de un segundo cable de guarda, también fué analizado por Sargent y Daverniza, cuyos resultados indican un significativo mejora miento de la tasa de salidas de servicio ya sea en forma parcial o de am bas ternas simultáneamente, siendo el porcentaje de reducción superior al 58%.

1.3.2.3 Nivel de Aislamiento Relativo de Cada Una de Las Ternas (Aislamiento Diferencial)

A fin de reducir la tasa de salida de servicio de las dos ter nas de una Línea de Transmisión, se puede hacer uso del aislamiento dife rencial, que se basa en el uso de diferentes niveles de aislamiento para las dos ternas de la línea. Los resultados de algunos estudios ex perimentales en líneas de doble terna, indican que a pesar que el aislamiento dife rencial puede reducir la tasa de salidas de las dos ternas simultáneamente en alguna extensión, la cantidad de aislamiento diferencial requerido para eli minar completamente las salidas de servicio de las dos ternas, podría no ser razonable para el costo económico y diseño de la línea. Además, la apli cación de este procedimiento normalmente necesita el bajo aislamiento de una de las ternas, mientras que los resultados experimentales muestran que esto ocasiona un incremento del número total de salidas de servicio.

1.3.2.4 Tensión y Localización de las Fases en la Torre

El orden en que las fases están comprometidas con las salidas de servicio, depende primordialmente de tres factores: Los potenciales de las crucetas de la torre, los factores de acoplamiento entre los conductores y el sistema de cable de guarda y los voltajes instantáneos a la frecuencia de generación en las fases. Ha sido demostrado que los efectos de la dife rencia de potencial de las crucetas y los factores de acoplamiento son grandemente cancelados entre ellos mismos; por lo tanto es evidente que la probabilidad de contorneos inversos para una localización particular de

un conductor es grandemente influenciada por la magnitud relativa de los voltajes instantáneos a la frecuencia de generación.

Análisis realizados para una línea de transmisión específica (17) muestran que la mayor proporción del primer contorneo ocurrió en la fase con el más alto voltaje instantáneo a la frecuencia de generación, mientras que el efecto de la localización del conductor en la torre no fue tan pronunciado.

1.3.3 Ondas de Impulso de Rayo

Uno de los requerimientos de mayor importancia en la protección contra las descargas atmosféricas, es el conocimiento de la magnitud, duración y forma de las ondas de tensión y corriente de los transitorios originados por los impactos de rayo.

1.3.3.1 Ondas de Voltaje

Las primeras mediciones de las ondas de voltaje de los rayos fueron hechas con el Klydonógrafo y el Oscilógrafo de Rayos Catódicos implementado posteriormente. El máximo voltaje registrado fué de 5,000 kilovoltios y fué obtenido (14) por Pittman y Torok con un oscilógrafo de rayos catódicos por efecto de un impacto directo a un conductor de 110 kV. La (Figura 12), muestra siete oscilogramas obtenidos por J.H. Cox y E.Beck, en los cuales se pueden observar que los frentes de onda varían de 2 á 7 microsegundos y la proporción de elevación de voltaje puede ser tan alta como 270 kV por microsegundo. Para comparación también ha sido graficada una onda típica de prueba (curva punteada) usada por el Laboratorio Trafford.

1.3.2.2 Ondas de Corriente

La medición de la corriente total originada por descargas atmosféricas directas, resulta un problema difícil debido a la necesidad de

contar con un punto en donde se pueda medir la corriente en su magnitud total. Esto ha llevado a la utilización de mástiles en las partes más altas, donde se quieran hacer las mediciones. Sin embargo, esto no ha solucionado el problema enteramente, ya que para los casos que por lo general ocurren en líneas de transmisión con estructuras poco elevadas, la posibilidad de que un impacto de rayo alcance un mástil sobre las estructuras es mínima.

Stekolnikov y Valiev en Rusia en 1936 obtuvieron los primeros oscilogramas de la corriente de impacto de rayos directos, a través de los cuales lograron registrar frentes de onda de 1.5 á 10 microsegundos y una proporción de elevación de 1.8 á 9 kiloamperios por microsegundo. Los instrumentos utilizados en estas mediciones fueron un oscilógrafo de rayos catódicos y el klydonógrafo rotatorio de alta velocidad.

La Figura 13 da las curvas del porcentaje de distribución para impactos directos como una función de la magnitud de cresta (14). Estas curvas fueron obtenidas por diversos investigadores, los cuales utilizaron diferentes criterios para las mediciones de corrientes de rayo; por lo que convendría un análisis más profundo de cada una de las curvas para sacar una conclusión útil.

Crestas de corriente tan altas como 220,000 amperios son indicadas para los impactos en líneas; sin embargo, como estos fueron obtenidos por la suma de corrientes en muchas torres, el resultado puede ser un poco elevado y por lo tanto se considera que la corriente más elevada registrada excede algo más de los 160,000 amperios, medida en la estación de registro de Whestinghouse.

Respecto a los frentes de onda, las mediciones hechas con el Registrador Magnético de Frentes de Onda indican un límite inferior de 0.5 microsegundos y un límite superior de 20 microsegundos.

En el Perú (18), estudios realizados por C.M. Foust, B. C.

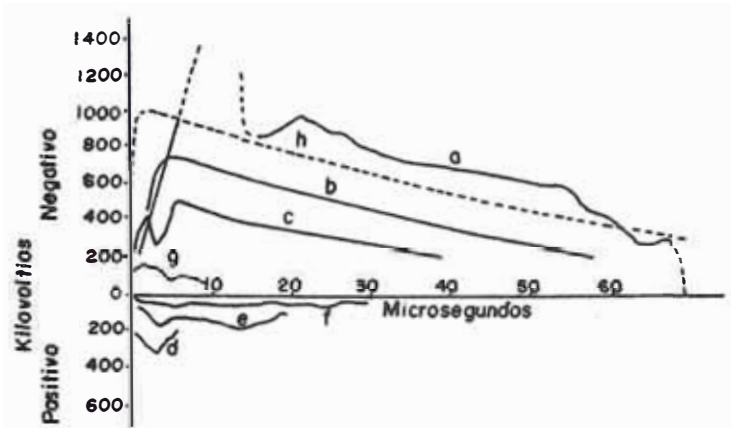


Figura 12.- Registro de Rayos Típicos obtenidos con el Oscilógrafo de Rayos Catódicos

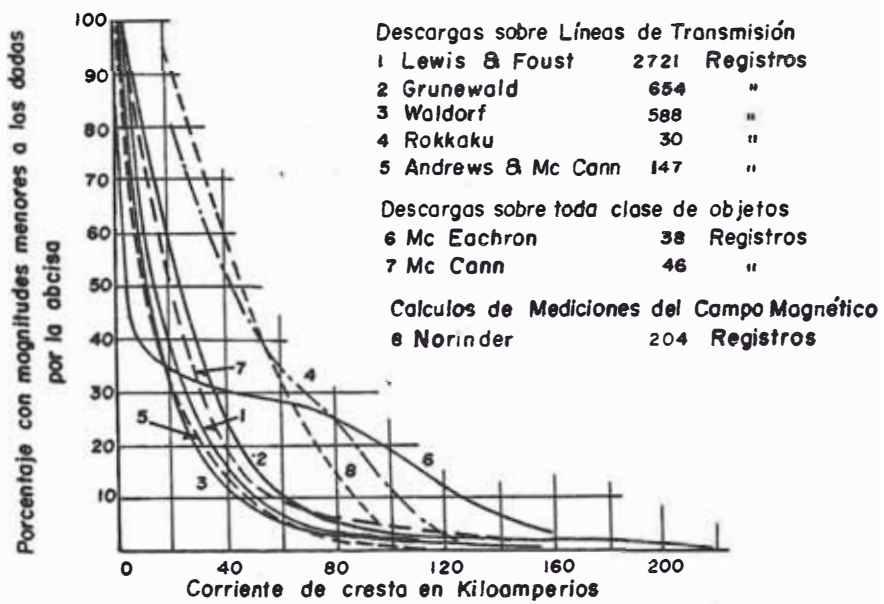


Figura 13.- Curvas de porcentaje de distribución de los Impactos de Rayo de acuerdo a la Corriente de Cresta

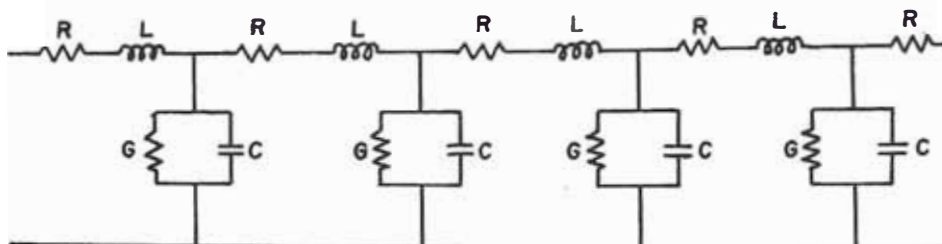


Figura 14.- Representación de una Línea de Transmisión en su estado transitorio

Maine y C. Lee en una Línea de Transmisión de Centromin Perú a un nivel de tensión de 50 kV y a más de 4,400 m.s.n.m. permitieron conocer el rango de estas corrientes, las que varían entre 7,100 y 119,000 amperios.

1.3.4 Efectos de Dispersión de las Corrientes de Rayo en Una Línea

Cuando se hace el estudio del comportamiento de una línea de transmisión para fenómenos transitorios de origen externo al sistema, su representación no puede ser hecha a través de las configuraciones tradicionales utilizadas para el estudio de las líneas de transmisión en su estado de funcionamiento normal. La forma más común de representar una línea de transmisión para el estado transitorio es la mostrada en la Figura 14.

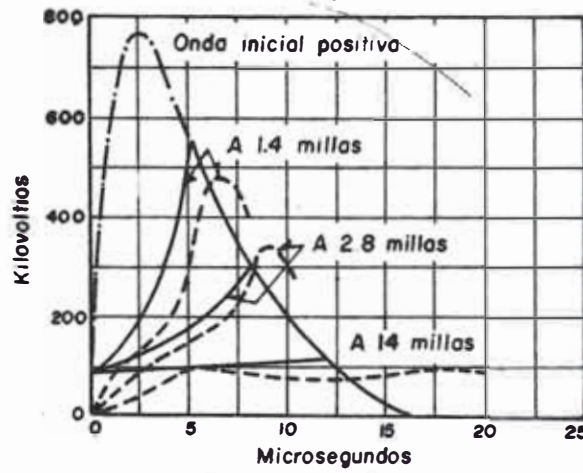
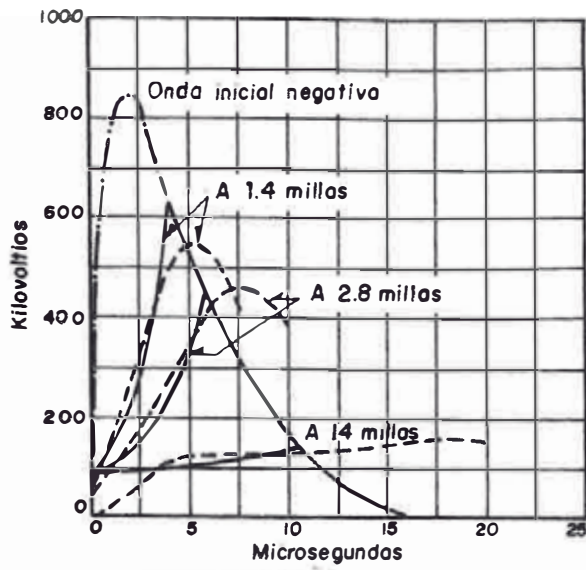
1.3.4.1 Atenuación y Distorsión

A medida que las ondas de rayo se propagan por una línea van a sufrir efectos de atenuación y distorsión, causados principalmente por pérdidas de energía en la onda debido a la resistencia óhmica, a la dispersión, a las pérdidas dieléctricas y al efecto corona. Para voltajes suficientemente altos, el efecto corona es el factor más importante y es debido a él que las ondas son atenuadas dentro de unos pocos kilómetros a niveles seguros.

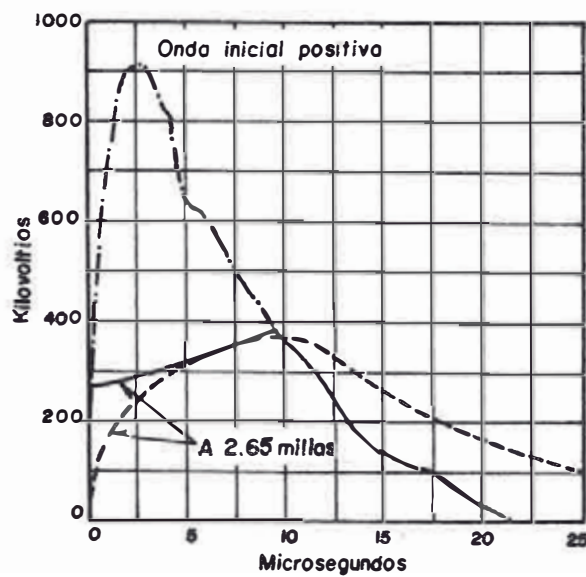
El fenómeno de distorsión y atenuación que se puede producir en una línea es mostrado en los oscilogramas de la Figura 15, los cuales fueron obtenidos para varios estudios hechos con ondas artificiales en líneas de transmisión.

Para el caso especial de la Figura 14, en que se cumple la relación

$$\frac{R}{L} - \frac{G}{C} = 0 \quad (7)$$



(a) Curvas punteadas: Oscilogramas obtenidos por Brune & Eaton
 Curvas llenas: Según cálculos realizados por Skilling & Dykes



(b) Curvas punteadas: Oscilogramas obtenidos por Conwell y Fortescue
 Curvas llenas: Según cálculos realizados por Skilling & Dykes

Figura 15. - Oscilogramas de descargas artificiales mostrando la atenuación y distorsión

las ondas son atenuadas sin distorsión. En las líneas de transmisión actuales, la conductancia G en paralelo es tan baja que puede ser considerada despreciable y la ecuación (7) no puede ser satisfecha; por lo tanto, la onda no solamente es atenuada, sino también distorsionada.

El efecto de atenuación debido a la resistencia es insignificante comparado con otros factores como el efecto corona, el cual incrementa el radio efectivo de un conductor y por lo tanto influye en la onda de impedancia y en el factor de acoplamiento*, e incrementa sustancialmente la atenuación y distorsión de una onda viajera (19).

1.3.4.2 Diagramas de ENREJADO (LATTICE)

Cuando un circuito consiste de un cierto número de impedancias en paralelo distribuidas a lo largo de la línea (Figura 16a), la solución de la propagación de impulsos es facilitada y simplificada por medio de los diagramas de Enrejado de Bewley (14), que pueden ser utilizados tanto para las ondas de tensión, como para las de corriente de rayo. Si en la Figura 16a una onda viajera e_f se mueve de izquierda a derecha hacia "a", cuando alcanza el punto "a" se produce una onda transmitida y una onda reflejada. Estas dos ondas pueden ser expresadas como sigue :

$$e_t \quad : \quad \text{onda transmitida} = \alpha_a e_f \quad (8)$$

$$e_r \quad : \quad \text{onda reflejada} = \beta_a e_f \quad (9)$$

donde α_a es el coeficiente de transmisión, el cual es igual a :

$$\frac{2 R_a}{Z + 2 R_a} \quad (10)$$

y β_a es el coeficiente de reflexión, y es igual a :

$$- \frac{Z}{Z - 2 R_a} \quad (11)$$

* Factor de Acoplamiento : Es la relación entre la Sobretensión inducida en los conductores de base y la sobretensión producida en el cable de guarda por el impacto de un rayo.

Mientras que la impedancia de onda sea igual en ambos lados de la resistencia R_a , las ondas transmitida y reflejada serán independientes de la dirección desde la cual se propaga la onda, en caso contrario donde exista asimetría, esta afirmación es falsa. Así, si la impedancia de onda de la línea a la izquierda de la resistencia es Z y a la derecha Z' , entonces para una onda moviéndose del lado izquierdo hacia el punto a , el coeficiente de transmisión es :

$$\alpha_a = \frac{2 R Z'}{RZ + RZ' + ZZ'} \quad (12)$$

y el coeficiente de reflexión es :

$$\beta_a = \frac{RZ' - RZ - ZZ'}{RZ + RZ' + ZZ'} \quad (13)$$

Para una onda moviéndose de la derecha a la izquierda, el coeficiente de transmisión, δ_a es :

$$\delta_a = \frac{2 R Z}{RZ' + RZ + ZZ'} \quad (14)$$

y el coeficiente de reflexión δ_a es :

$$\delta_a = \frac{RZ - RZ' - ZZ'}{RZ' + RZ + ZZ'} \quad (15)$$

Cuando la onda transmitida desde a alcanza b , ocurre otra reflexión y transmisión parcial. La onda reflejada de b es parcialmente transmitida y reflejada de a . Esto continúa a través de toda la red hasta que las componentes han sido reducidas a cero. Por intermedio del sistema de la Figura 16b, se puede tener una descripción de cada componente no solamente en magnitud, sino también en tiempo. La distancia horizontal representa la longitud a lo largo de la línea y la distancia vertical al tiempo. Para determinar el voltaje instantáneo en algún punto como x , es necesario sumar las diferentes componentes con sus propias relaciones de tiempo como se muestra en la Figura 16c.

1.3.4.3 Distribución de la Onda de Rayo en la Torre y el Cable de Guarda

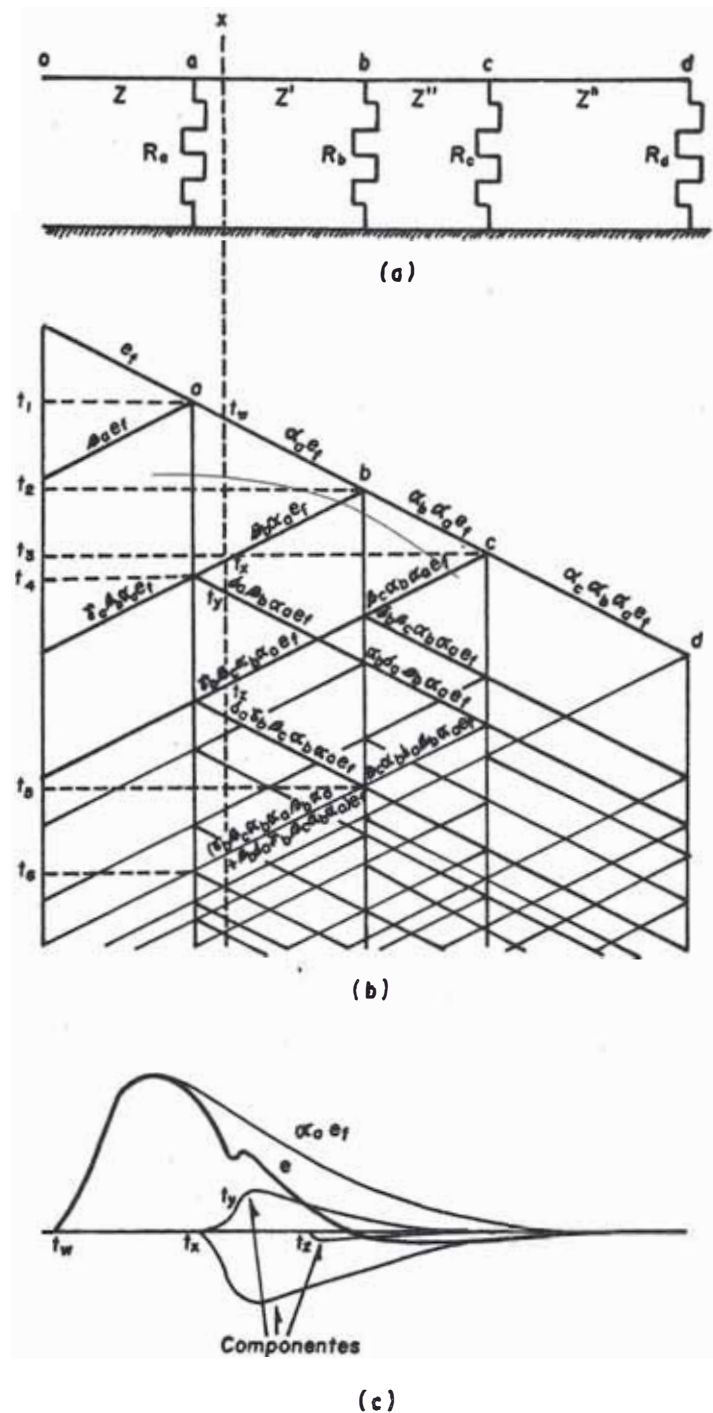


Figura 16.- Diagrama de ENREJADO

- (a) Circuito equivalente de la Línea con varias impedancias en paralelo
- (b) Diagrama de Enrejado para las tensiones del circuito (a)
- (c) Suma de los componentes del diagrama de Enrejado para obtener la tensión resultante de un punto dado

La distribución de la corriente de rayo en la torre y el cable de guarda, cuando un impacto de rayo cae en la cima de una estructura, puede ser determinada directamente de las ecuaciones de campo electromagnético de Maxwell o también a través de la teoría simple de onda viajera, reconociendo siempre las limitaciones del último método.

Los elementos básicos de la teoría de la onda viajera según Charles J. Miller (20) son ilustrados en la Figura 17, la cual muestra un rayo con una corriente $I_0(t)$ impactando en la cima de una torre. En este diagrama, Z_g representa la impedancia de onda del sistema de cable de guarda en cada dirección, mientras Z_t representa la impedancia de onda de la torre. La corriente de impacto de rayo se considera que se divide inversamente proporcional a la impedancia de onda de los tres caminos que salen de la cúspide de la torre.

Un esquema de reflexión convencional de Enrejado, el cual analiza el curso de la onda de voltaje que viaja en la torre hacia abajo es mostrado en la Figura 18. El eje del tiempo es graficado verticalmente, mientras que la distancia está en el eje horizontal. En este diagrama, la onda de voltaje inicial $I_0 Z_R$ es mostrada moviéndose hacia la base de la torre, donde va a llegar en 0.15 microsegundos para una torre de 150 pies. Si la resistencia de puesta a tierra de la torre R_F es menor que la impedancia de onda de la torre Z_t , la onda de voltaje reflejada va a ser invertida en polaridad y su magnitud va a depender del coeficiente de reflexión β_i , el cual es una función de R_F y Z_t .

Cuando la primera onda reflejada retorna a la cúspide de la torre, una segunda onda reflejada va a ser generada y su polaridad y magnitud va a depender de la impedancia de onda relativa del sistema de cable de guarda y de la torre. Estas reflexiones van a continuar originando viajes de bajada y subida en la torre, hasta que su energía es disipada.

En el caso de contorneos anormales, en los cuales se tiene gran interés, la primera onda reflejada que retorna a la cúspide de la

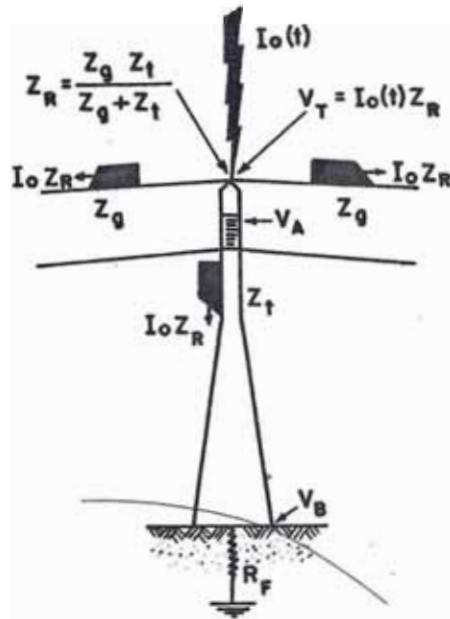
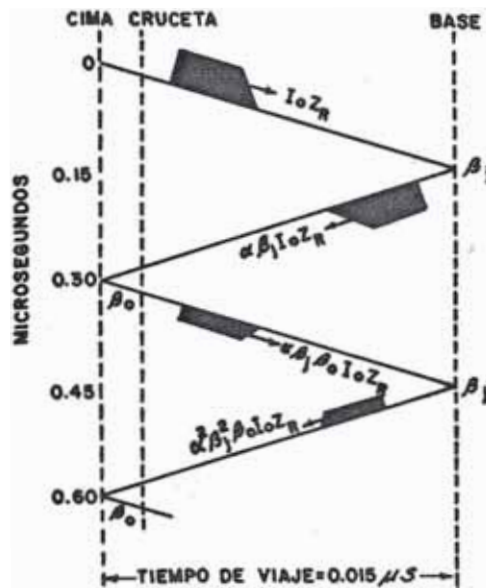


Figura 17.- Elementos básicos de la teoría de la onda viajera



β_0, β_1 : Coeficientes de reflexión
 α : Voltaje remanente por unidad
 despues de la atenuacion en
 un viaje de ida y vuelta

Figura 18.- Diagrama de enrejado mostrandó la relación espacio-tiempo de las ondas viajeras en una torre

torre es la de mayor importancia, dado que esta onda es la que alivia el voltaje aparecido en la cúspide.

El uso de la teoría de campos electromagnéticos, para la solución del problema del comportamiento de los impactos de rayo en las estructuras de alta tensión, ha sido tratado en primer lugar por Wagner y posteriormente por R. Lundholm, R.R. Finn Jr. y W.S. Price. La teoría de campos es mucho más refinada que la teoría de la onda viajera, la cual desprecia ciertas consideraciones como la tensión inducida en el conductor de fase por las corrientes en el cable de guarda, el voltaje que puede ser inducido en el espacio ocupado por los aisladores debido a las ondas de corriente en la torre y el cable de guarda y por último aquellos voltajes que podrían ser producidos por el campo eléctrico y magnético alrededor del rayo mismo.

1.4 ESTIMACION DE LOS NIVELES DE LAS CORRIENTES DE DISPERSION

1.4.1 Resistividad y Conductividad del Suelo

Las Normas ASA a través de su Boletín American Standard Definitions of Electrical Terms C42, define a la resistividad de la siguiente manera: "La resistividad de un material es el recíproco de su conductividad".

A la vez, a través del mismo boletín define a la conductividad como: "La conductividad de un material es la conductancia en corriente continua entre las caras opuestas paralelas de una porción del material, de longitud unitaria y sección unitaria uniforme".

Las unidades de resistividad más comunmente usadas son: Ohm-metro, Ohm-centímetro, Ohm-pulgada, etc., las cuales son dimensionalmente correctas; aunque es posible hallar en ciertas publicaciones otras unidades dimensionalmente incorrectas y que deben ser evitadas usar, siendo es

tas las siguientes : Ohm/metro, Ohm/metro³ y Ohm por m³.

La conductividad eléctrica de los materiales que constituyen la superficie del terreno, es muy baja comparada con la alta conductividad de los metales. Los dos principales constituyentes de la tierra : El Oxido de Silicio y el Oxido de Aluminio realmente son excelentes aisladores, y la conductividad de la tierra se debe en gran medida a las sales y a la humedad embebida entre estos aisladores. Por otro lado, aún un semiconductor podría llevar una considerable cantidad de corriente si solamente la sección cuadrada es lo suficientemente grande y a este respecto la tierra por su gran profundidad, no **presenta limitaciones.**

La conducción por el terreno es fundamentalmente de carácter electroquímico y depende principalmente de :

- a) Volúmen de los poros que componen el terreno
- b) Disposición y distribución de los poros
- c) Porción de los poros rellenos con agua
- d) Conductividad del agua que llena los poros, la cual se compone a la vez de :
 - d1) Conductividad Primaria : La del agua que entra en los poros.
 - d2) Conductividad Secundaria : La adquirida por disolución material y depende del estancamiento.

La resistividad de un terreno vale aproximadamente :

$$\rho_T = \rho_a f(c ; V_p) \quad (16)$$

donde ρ_a es la resistividad del agua que llena los poros, c es una constante que depende de la distribución de los poros y V_p es el volúmen de los poros (21).

1.4.2 Parámetros que Influyen en la Resistividad del Suelo

1.4.2.1 Tipo de Suelo

Los valores de resistividad basados en las clasificaciones del suelo van a permitir tan solo una cruda aproximación, por lo que es recomendable realizar pruebas eléctricas de medición para obtener un valor más confiable y exacto. Sin embargo, estos valores estimados usados con cierto criterio, pueden ser de gran ayuda para un estudio preliminar del terreno o en casos en que sea imposible conocer la resistividad del terreno mediante mediciones en el sitio. En la Tabla I se presenta una clasificación estimada de los diferentes tipos de suelo.

TABLA I

Tipo de Terreno	Resistividad (Ohm-metro)
Terrenos Vegetales Húmedos	10 - 50
Arcillas, Gravas, Limos	20 - 100
Arenas Arcillosas	80 - 200
Fangos, Turbas	150 - 300
Arenas	250 - 500
Suelos Pedregosos (poca vegetación)	300 - 400
Rocas	1000 - 10000

1.4.2.2 Variaciones de Las Estaciones

La resistividad del suelo varía según van transcurriendo los meses del año, sobre todo en lugares donde hay extremos de temperatura, lluvia, sequía y otras variaciones de las estaciones.

La Figura 19 muestra los cambios de la resistencia de Puesta a Tierra, debido a la variación de resistividad de dos electrodos enterrados a diferente profundidad, durante un período de año y medio. En esas curvas se puede ver que el electrodo más profundo presenta valores más estables y más bajos, por lo que se puede concluir que el contenido de hume

dad y temperatura del suelo, son más estables a mayores profundidades ba
jo la superficie.

1.4.2.3 Influencia de la Humedad

La cantidad de humedad del terreno influye grandemente en su resistividad, puesto que la cantidad de agua en el suelo varía con el clima, tiempo del año, naturaleza del subsuelo y profundidad de la napa freática. La Tabla II muestra los efectos típicos del agua en el suelo, en la que se puede ver que para los dos tipos de suelo considerados, cuando se encuentran completamente secos son excelentes aisladores; pero con un contenido de humedad del 15 % se puede notar un drástico decrecimiento en la resistividad (22).

TABLA II

EFECTO DE LA HUMEDAD EN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Contenido de Humedad % Por Peso	Resistividad, Ohm - m	
	Terreno Superficial	Suelo Arenoso
0	10×10^6	10×10^6
2.5	2500	1500
5	1650	430
10	530	220
15	210	130
20	120	100
30	100	80

1.4.2.4 Influencia de La Temperatura

Respecto a este factor no se dispone de mucha información, aunque dos verdades conducen a la conclusión lógica que un incremento de la temperatura va a disminuir la resistividad : Primero, el agua presente en el suelo influye grandemente en la resistividad y, Segundo, un incremento en temperatura muy marcado, disminuye la resistividad del agua. Es to es confirmado por los resultados de la Tabla III (22).

TABLA III

EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Temperatura		Resistividad Ohm - metro
°C	°F	
20	68	72
10	50	99
0	32 (agua)	138
0	32 (hielo)	300
- 5	23	790
-15	14	3300

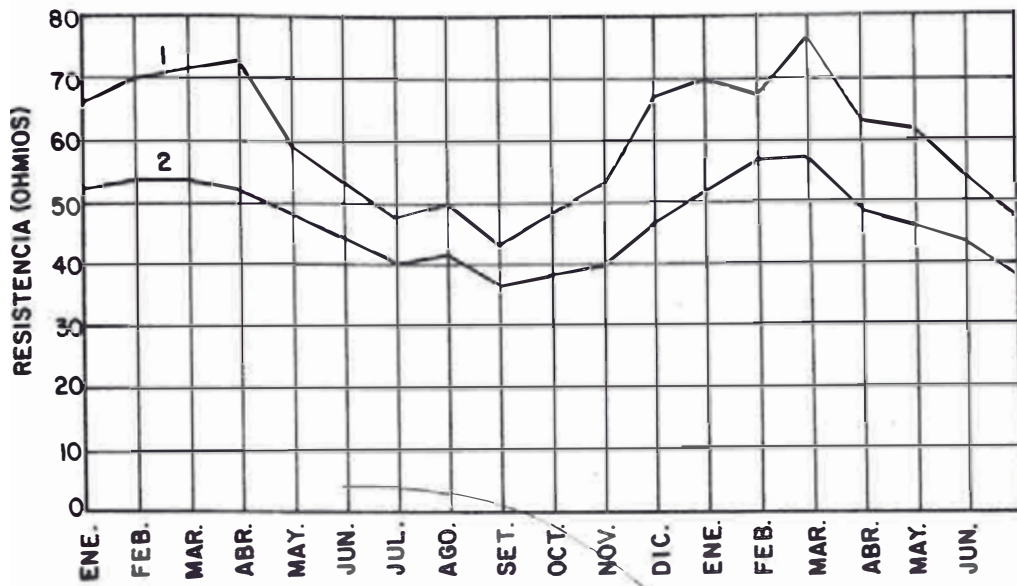
1.4.2.5 Influencia de las Sales en el Terreno

La presencia de sales en el terreno igual que en el caso de la Humedad, va a disminuir la resistividad del terreno. Basta tan solo una pequeña cantidad de sal para lograr una reducción apreciable de la resistividad, tal como se puede ver en la Tabla IV (22).

TABLA IV

EFECTO DEL CONTENIDO DE SALES EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Porcentaje de Sal Agregada Por Peso de Humedad	Resistividad Ohm - cm.
0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5	190
10	130
20	100



1: Electrodo enterrado a 3 pies
 2: Electrodo enterrado a 10 pies

Figura 19.- Variación de la Resistencia de Puesta a Tierra de dos electrodos verticales con el transcurso de las estaciones

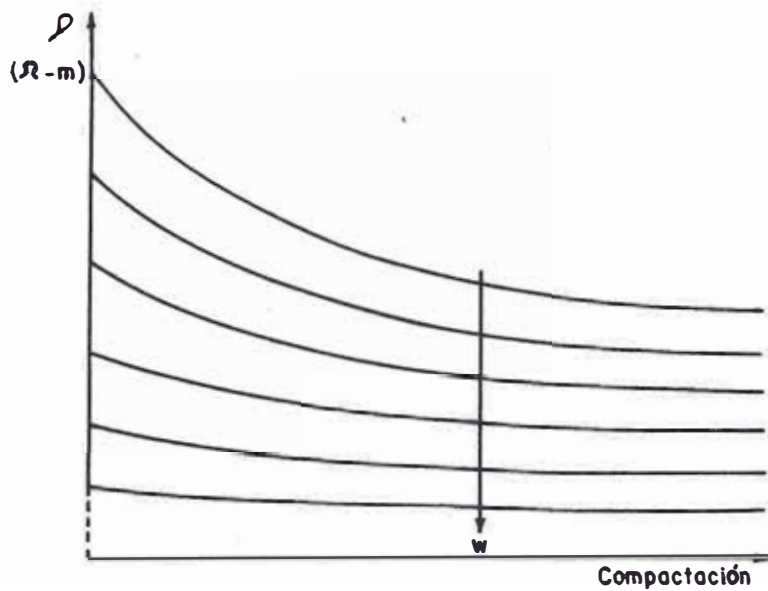


Figura 20.- Efecto de la compactación del suelo en la resistividad

1.4.2.6 Compactación del Suelo

A medida que se aumenta la compactación del terreno, se logra la disminución de la resistividad del mismo. Esto se logra debido a que una mayor compactación del terreno disminuye la distancia entre partículas y se logra una mejor conducción a través del líquido contenido. En las curvas de la Figura 20, se puede observar que existe un punto en el cual por más que se aumente la compactación no se va a lograr rebajar la resistividad, haciéndose esto más notorio a medida que aumenta el contenido de humedad. El motivo de este fenómeno es que el agua que envuelve la mayoría de las partículas alcanza una especie de saturación y un mayor acercamiento entre éstas, no influye en la inducción.

1.4.3 Influencia del Tipo de Electrodo en la Dispersión De Corriente

1.4.3.1 Electrodos Esféricos

Es la forma de electrodo más simple y fácil de ser analizada, pudiendo estar completamente embebido en la tierra o tan sólo tener su hemisferio inferior embebido bajo la superficie plana de la tierra como se muestra en la Figura 21. Haciendo un análisis para el flujo de corriente a través de este tipo de electrodo, se puede determinar que la corriente se va a propagar radialmente, siendo la densidad de corriente a una distancia x del centro del hemisferio :

$$i = \frac{I}{2 \pi x^2} \quad \text{Amp/m}^2 \quad (17)$$

I = Corriente inyectada a través del Electrodo

En caso de ser usados dos electrodos similares al anterior, a través de los cuales la corriente entra y sale de la tierra, las líneas de corriente se desarrollan como una superposición de dos distribuciones hemisféricas de corriente. La Figura 22a, muestra la forma de las líneas de co

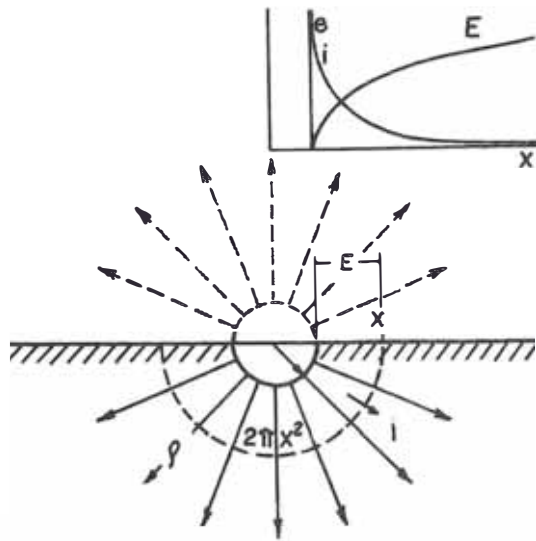
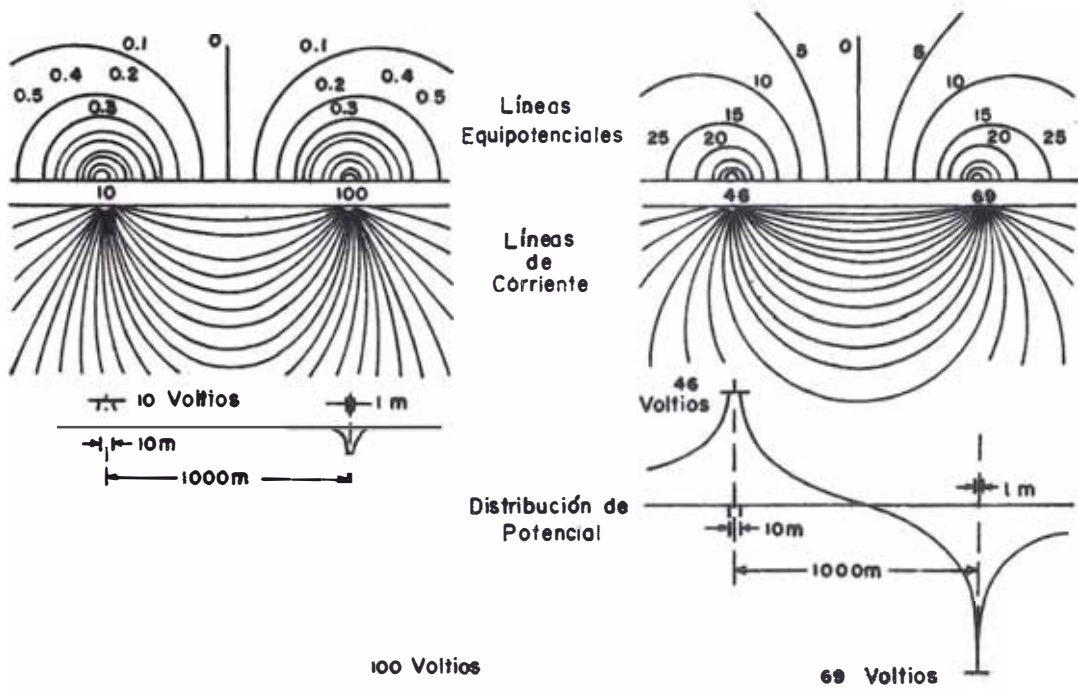


Figura 21.- Flujo de corriente para un electrodo esférico



(a) Corriente fluyendo en la parte profunda

(b) Corriente fluyendo en la capa superficial

Figura 22.- Flujo de corriente entre dos electrodos de puesto a tierra esféricos

corriente y equipotenciales, cuando se imprime una tensión de 110 voltios entre los dos electrodos, teniendo uno de ellos un metro de diámetro y el otro 10 metros. En esta figura se puede ver que las líneas de corriente se concentran principalmente alrededor del electrodo más pequeño.

La Figura 22b, muestra el mismo caso anterior, pero con la diferencia de que las líneas de corriente no se desarrollan mayormente en la parte profunda del terreno, sino que se hacen más densas cerca de la superficie, debido a la existencia de una capa altamente conductora en la superficie de la tierra.

1.4.3.2 Electrodos Verticales

El flujo de corriente de un electrodo vertical o jabalina puesta a tierra se irradia en todas las direcciones a través del terreno alrededor del electrodo. Puede considerarse que la corriente fluye a través de una serie de cilindros esféricos concéntricos de igual espesor, en la dirección indicada por las flechas de la Figura 23.

El cilindro de tierra más cercano al electrodo, naturalmente tiene la más pequeña área superficial y por lo tanto ofrece la mayor resistencia. El próximo cilindro de tierra es algo más grande en área y ofrece menos resistencia y así progresivamente. Finalmente va a ser alcanzado un cilindro a cierta distancia del electrodo, donde la inclusión de un cilindro adicional de tierra, no contribuye significativamente a la resistencia de la tierra en los alrededores del electrodo.

1.4.3.3 Electrodos Horizontales o Contrapesos

Este tipo de electrodos son usados por lo general en suelos de naturaleza rocosa o pedregosa y cuando son demasiado largos, la corriente puede sufrir una caída ohmica debido a la resistencia interna r del electrodo, antes de dispersarse en los alrededores del terreno (Resistividad ρ del terreno). La Figura 24, muestra la manera en que la corriente total I_0 en

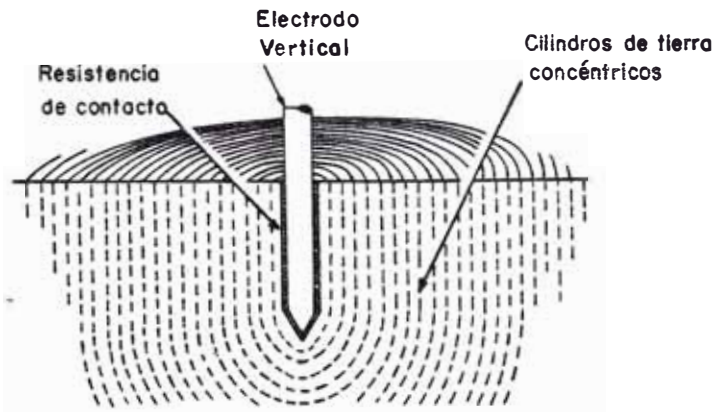


Figura 23. - Flujo de corriente en un electrodo vertical

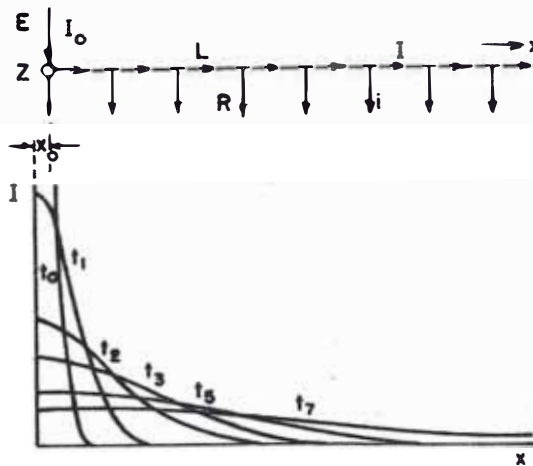
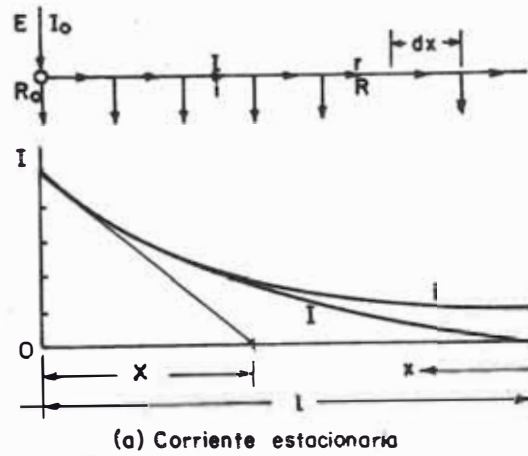


Figura 24.- Distribución de la corriente a lo largo de un contrapeso

tra a un contrapeso, sigue a lo largo de su extensión, siendo gradualmente atenuada y dejando el conductor como una corriente espacial i .

Es posible calcular la distribución de la corriente I a lo largo del conductor, lo mismo que la distribución de la corriente a tierra i , haciendo uso de las siguientes ecuaciones (21) :

$$I = \frac{\text{Sen } h \delta x}{\text{Sen } h \delta l} I_0 \quad (18)$$

$$i = \delta \frac{\text{Cos } h \delta x}{\text{Sen } h \delta l} I_0 \quad (19)$$

donde :

i : Amperios por metro

I : Amperios

r : Ohmios

ρ : Ohmios - metro

δ : $\sqrt{\frac{r}{\rho}}$

la variación de las corrientes I e i puede verse en la Figura 24b.

1.4.3.4 Otras Formas de Electrodo

Existen otras formas geométricas de electrodos tales como anillos concéntricos, platos sólidos, electrodos planos rectangulares, etc., los cuales son poco usados en la práctica. Como en los anteriores electrodos, la dispersión de la corriente va a realizarse en forma normal a la superficie de cada uno de los electrodos. El caso de los anillos concéntricos es muy importante, ya que el incremento del número de lazos permite el control y la regulación de los gradientes de potencial.

1.4.4 Evaluación de las Corrientes Eléctricas en el Cuerpo Humano

Los efectos de la corriente eléctrica cuando fluye a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen principalmente de la duración, magnitud y frecuencia de esta corriente. La consecuencia más peligrosa de esta situación podría ser la fibrilación ventricular, que daría como resultado el paro inmediato de la circulación de la sangre.

1.4.4.1 Efecto de la Frecuencia

Experimentos llevados a cabo indican que las personas son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencias de 50 y 60 Hz, a tal punto que corriente de 0.1 amperios pueden ser letales. Autoridades en la materia están de acuerdo en que el Cuerpo Humano puede soportar corrientes mucho mayores cuando la frecuencia es de 25 Hz y aproximadamente cinco veces mayores en corriente continua. De igual manera a frecuencias de 3,000 á 10,000 Hz. pueden ser soportadas corrientes elevadas. En el caso de descargas atmosféricas, el Cuerpo Humano parece estar apto para tolerar corrientes muy altas, quizás del orden de cientos de amperios (13).

1.4.4.2 Efectos de la Magnitud y Duración

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica en el Cuerpo Humano de acuerdo al orden de crecimiento de la magnitud son : Percepción de la corriente, contracción muscular, pérdida del conocimiento, fibrilación del corazón, bloqueo del aparato respiratorio y quemaduras.

Un miliamperio es conocido como el umbral de la percepción, en el cual una persona está capacitada para detectar una leve sensación de hormigueo en sus manos o yema de los dedos, causada por el paso de la corriente.

Las corrientes de uno a seis miliamperios son posibles de soportar aunque en forma desagradable, no perjudican la capacidad de una per

sona para controlar sus músculos al tener un objeto energizado en sus manos y poder soltarlo.

En un rango de 9 á 25 mA, las corrientes pueden ser un poco dolorosas y hacer difícil e imposible soltar los objetos energizados que se tengan cogidos con la mano. Para corrientes aún más altas, las contracciones musculares pueden hacer difícil la respiración, aunque estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente es interrumpida, a menos que la contracción sea muy severa y la respiración sea parada no por segundos sino por minutos. Aún en estos casos es posible resucitar a las personas afectadas.

Recién para corrientes en un rango de 100 mA, ocurren acontecimientos tales como la fibrilación ventricular, paralización del corazón o inhibición de la respiración, los cuales podrían causar daño o muerte, siendo difícil resucitar a las personas afectadas.

Dalziel y otros investigadores han mostrado que la corriente de no fibrilación de magnitud I_B en rangos de duración de 0.03 á 3 segundos está relacionada con la Energía absorbida por el cuerpo, como se muestra en la siguiente ecuación :

$$I_B)^2 t = K \quad (20)$$

donde :

- I_B es la magnitud de la corriente (rms) fluyendo a través del cuerpo
- t es la duración del flujo de corriente
- K es una constante empírica relativa a la energía tolerable en un shock eléctrico por un porcentaje de una población dada.

1.4.4.3 Límite Permissible de Corriente en el Cuerpo Humano

La duración de una corriente de 50 ó 60 Hz que puede ser tolerada por la mayoría de personas, está relacionada con su magnitud por

la ecuación (20). Basándonos en los estudios de Dalziel, es asumido que el 99.5% de todas las personas pesan aproximadamente 50 kg y pueden resistir con seguridad, sin fibrilación ventricular el paso de una corriente cuya magnitud y duración es determinada por la siguiente ecuación :

$$I_C = k / \sqrt{t} \quad (21)$$

donde :

I_C en Amperios

t en Segundos

k es derivada como $k = \sqrt{K}$

K es la constante de (20), la cual para un valor particular de $K = 0.0135$ basado en un peso del cuerpo de 50 kg y un porcentaje de la población del 99.5 % produce $k = 0.116$, dando como resultado :

$$I_C = 0.116 / \sqrt{t} \quad (22a)$$

La ecuación (22a) es válida para pruebas con límites de tiempo entre 0.03 y 3.0 segundos, por lo tanto no es válida para tiempos muy largos como en ciertos casos donde algunos valores de corriente tienen que ser tolerados indefinidamente.

En la edición de la AIEE Std. 80 1961, las constantes K y k en la ecuación (20) y (21) dadas como 0.0272 y 0.165, han sido asumidas válidas para el 99.5% de hombres pesando aproximadamente 70.3 kgs. Estudios más recientes de Dalziel publicados en 1968, llevan a un valor alternativo de $k = 0.157$ y $K = 0.0240$, los cuales son aplicables para personas de cualquier sexo con un peso de 70 kg. Por lo tanto se obtiene alternativamente :

$$I_C = 0.157 / \sqrt{t} \quad \text{para } 70 \text{ kg.} \quad (22b)$$

Queda al diseñador seleccionar la constante k apropiada para la ecuación (21), dependiendo del peso promedio del personal o público

que se espera va a transitar por el área diseñada.

1.4.4.4 Diferencia de Potenciales Permisibles

Usando el valor tolerable de corriente en el Cuerpo Humano establecido por las ecuaciones (22a) y (22b) y las constantes apropiadas del circuito, es posible determinar la diferencia de potencial entre dos puntos de contacto.

Las Figuras 25 y 26, muestran los circuitos equivalentes de un contacto entre los dos pies y entre una mano y los pies, en los cuales se ha empleado la nomenclatura siguiente :

- d_p : Distancia entre los pies
- I_A : Corriente del circuito accidental
- R_A : Resistencia efectiva total del circuito accidental
- I_C : Corriente límite del cuerpo, definida por las ecuaciones (22a) y (22b)

También :

$$R_{2P_s} = 2(R_p - R_{MP}) \quad (23)$$

$$R_{2P_p} = \frac{1}{2} (R_p + R_{MP}) \quad (24)$$

donde :

- R_p : Resistencia propia de uno de los pies
- R_{MP} : Resistencia mutua de un pie con respecto a otro
- R_{2P_p} : Resistencia de dos pies en paralelo
- R_{2P_s} : Resistencia de dos pies en serie

El cálculo de las resistencias anteriores puede realizarse a partir de las ecuaciones desarrolladas por Sunde, para el cálculo de la resistencia propia y mutua de dos discos metálicos de radios b , separados por una distancia d_p sobre una superficie de terreno homogéneo de resistividad ρ , las mismas que son :

$$R_p = \rho / (4b) \quad [\Omega, \Omega\text{-m}, m] \quad (25)$$

$$R_{MP} = \rho / (2 \pi d_p) \quad [\Omega, \Omega\text{-m}, m] \quad (26)$$

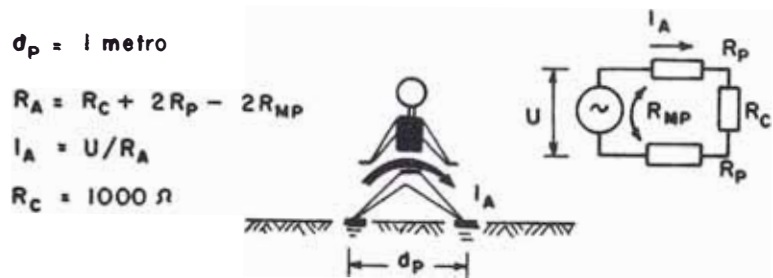


Figura 25

Circuito para la tensión de paso



Figura 26

Circuito para la tensión de toque

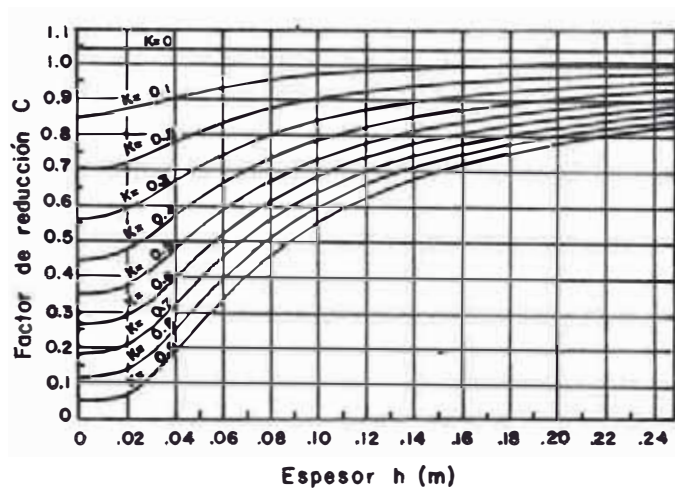


Figura 27

Factor de reducción C como una función del factor de reflexión K y del espesor de la capa superficial h

Por lo tanto, las resistencias en serie y paralelo de dos pies pueden ser calculadas con gran aproximación para un pie representado por un disco de 8 cm de radio y despreciando la resistencia mutua con las siguientes ecuaciones :

$$R_{2Ps} = 6 (\rho) [\Omega, \Omega - m] \quad (27)$$

$$R_{2Pp} = 1.5 (\rho) [\Omega, \Omega - m] \quad (28)$$

donde :

(ρ) es el valor de la resistividad del suelo en Ohm-m.

Las dos ecuaciones anteriores se cumplen cuando se considera una resistividad del suelo uniforme ; pero en los casos prácticos en que se trata de tener una capa de mayor resistividad en la superficie del terreno, estas fórmulas tienen que ser modificadas, obteniéndose :

$$R_{2Ps} = 6.0 C (\rho_1) \quad \rho_1 \geq \rho_2 \quad (29)$$

$$R_{2Pp} = 1.5 C (\rho_1) \quad (30)$$

donde :

ρ_1 es la resistividad de la capa superficial

ρ_2 es la resistividad de la segunda capa

C es un factor de reducción para denotar el valor nominal de la resistividad de la capa superficial, determinada como sigue :

C = 1 para suelos uniformes

C = f(h,k) para suelos no uniformes

k es el factor de reflexión

h es la profundidad de la capa superficial

Para los casos en que $C \neq 1$ los valores de C se encuentran graficados en la Figura 27.

Finalmente, de las Figuras 25 y 26 se pueden deducir las ecuaciones para las tensiones de toque y paso críticas, las cuales son :

$$E_{\text{Paso}} = (R_C + R_{2Ps}) I_C \quad (31)$$

$$E_{\text{Toque}} = (R_C + R_{2Pp}) I_C \quad (32)$$

La resistencia del Cuerpo Humano R_C puede ser sustituida por una resistencia no inductiva, que puede variar en un rango entre 500 y 3,000 ohmios, seleccionándose el valor de 1,000 ohmios para los cálculos que necesiten la magnitud de la resistencia del Cuerpo Humano, ya sea entre los dos pies o entre una mano y los pies.

$$R_C = 1000 \Omega \quad (33)$$

Reemplazando (29), (30) y (33) en las ecuaciones (31) y (32) obtendremos :

$$E_{\text{Paso } 50} = (1000 + 6 C (\rho)) 0.116 / \sqrt{t} \quad (34a)$$

$$E_{\text{Paso } 70} = (1000 + 6 C (\rho)) 0.157 / \sqrt{t} \quad (34b)$$

$$E_{\text{Toque } 50} = (1000 + 1.5 C (\rho)) 0.116 / \sqrt{t} \quad (35a)$$

$$E_{\text{Toque } 70} = (1000 + 1.5 C (\rho)) 0.157 / \sqrt{t} \quad (35b)$$

donde

$E_{\text{Paso } 50, 70}$, $E_{\text{Toque } 50, 70}$ Son las tensiones de paso o Toque permisibles para una persona de 50 ó 70 kg respectivamente

(ρ) Es el valor numérico de la resistividad del material de la superficie, en ohm - m.

t Es la duración de la corriente de choque, en segundos.

CAPITULO II

METODOS DE CALCULO DE PUESTAS A TIERRA Y ATERRAMIENTOS

A fin de diseñar y operar un sistema eléctrico con el menor porcentaje de salidas de servicio y seguridad para el personal de mantenimiento y público en general, es necesario estudiar en forma cuidadosa el sistema de puesta a tierra.

En los casos más sencillos de aterramiento, los cálculos se hacen empleando las ecuaciones analíticas desarrolladas para cada tipo de electrodo en particular. Para sistemas de puesta a tierra compuestos o sea conformados por diferentes tipos de electrodos, existen métodos desarrollados especialmente para estos casos, y aún más con el incremento en número y tamaño de estos sistemas y la necesidad de una optimización económica, fué necesario desarrollar métodos más cuidadosos y versátiles orientados principalmente al empleo de la computadora como instrumento de apoyo.

2.1 PUESTAS A TIERRA DE LINEAS

2.1.1 Criterios de Diseño

Al hacer el diseño de una puesta a tierra en general existen tres puntos de vista desde los cuales se puede afrontar el problema, dependiendo si se trata de una puesta a tierra para la protección del personal,

de una puesta a tierra de servicio o de una puesta a tierra de protección del sistema contra las descargas atmosféricas.

2.1.1.1 Puestas a Tierra para Protección del Personal

Dado que actualmente las líneas de transmisión han comenzado a quedar dentro del perímetro urbano de las ciudades, es necesario tener mucho cuidado al hacer el diseño de los aterramientos, procurando obtener una regulación del potencial alrededor de las estructuras, de manera tal que las tensiones de toque y paso sean menores que los valores tolerables sugeridos en la última revisión de la Guía IEEE Std. 80, mostrados en el Acápito 1.4.4.4. Estas consideraciones también deberían ser tomadas en cuenta, aunque en menor grado en zonas despobladas, ya que el personal de mantenimiento de la línea va a estar expuesto igualmente a potenciales peligrosos.

Por otra parte, es muy común hacer el diseño de los aterramientos basándonos en un valor dado de resistencia, más esto no nos garantiza una tensión de toque y paso dentro de los límites aceptables y tan solo sirve como un valor referencial.

2.1.1.2 Puestas a Tierra de Servicio

Nos garantiza el buen funcionamiento de los equipos e instrumentos de las Subestaciones, Centrales, Laboratorios, etc. En el caso de las Líneas de Transmisión, permiten la actuación del sistema de protección de la línea, sobre todo de los relés de distancia que necesitan de una baja impedancia de puesta a tierra en las estructuras comprometidas con una falla a tierra. En caso de existir un aterramiento con una elevada resistencia de puesta a tierra va a ser imposible la actuación de los relés de distancia.

2.1.1.3 Puestas a Tierra como Protección de la Línea Contra Descargas Atmosféricas

Las fallas más frecuentes en las líneas de transmisión son las monofásicas a tierra, causadas generalmente por las descargas atmosféricas. En consecuencia es bastante común en la actualidad procurar obtener una resistencia de puesta a tierra tan baja como económicamente sea posible, de manera tal que se pueda garantizar menos de una salida de servicio por 160 km de línea por año (24).

Al hacer un diseño desde este punto de vista se busca obtener una resistencia de puesta a tierra lo más baja posible, sobre todo de las estructuras ubicadas en lugares donde sean fácilmente afectadas por las descargas atmosféricas (cumbre de los cerros) y con elevado nivel isoceraúfico.

2.1.2 Modelos de Aterramientos en Líneas de Transmisión

En líneas de transporte eléctrico los tipos de aterramientos más comúnmente utilizados son electrodos simples, contrapesos y en algunos casos ciertas combinaciones de estos electrodos. En casos excepcionales se recurre al uso de rellenos especiales o al tratamiento químico del terreno.

2.1.2.1 Electrodos Verticales

De acuerdo a la Figura 28, para un electrodo vertical enterrado a nivel del suelo, el potencial inducido en un punto P cualquiera del terreno por los elementos dx del electrodo real y dx' del electrodo imagen vale :

$$dV_P = \rho \frac{dl}{4\pi y} + \rho \frac{dl'}{4\pi y'} = \rho \frac{i(x) dx}{4\pi y} + \rho \frac{i(x') dx'}{4\pi y'} \quad (36)$$

si se supone una densidad de corriente lineal constante :

$$i(x) = \frac{I}{l} \quad (\text{Amp/m})$$

obtendremos :

$$V_P = \rho \frac{I}{4\pi l} \left\{ \int_0^l \frac{dx}{\sqrt{(x-z)^2 + r^2}} + \int_0^l \frac{dx'}{\sqrt{(x'+z)^2 + r^2}} \right\} \quad (37)$$

La solución de esta ecuación tiene dos formas posibles :

$$V_p = \rho \frac{I}{4 \pi l} \left\{ \ln \frac{\sqrt{(1-z)^2 + r^2} + (1-z)}{\sqrt{z^2 + r^2} - z} + \dots \dots \right. \\ \left. \ln \frac{\sqrt{(1+z)^2 + r^2} + (1+z)}{\sqrt{z^2 + r^2} - z} \right\} \quad (38)$$

o también :

$$V_p = \rho \frac{I}{4 \pi l} \left\{ \text{Arc Sen h } \frac{1-z}{r} + \text{Arc Sen h } \frac{1+z}{r} \right\} \quad (39)$$

Si se desea conocer el potencial del electrodo basta con reemplazar en la expresión de V_p para $r = a$. Las expresiones resultantes van a aparecer como función de la variable z , lo que no es posible ya que el potencial es con gran aproximación constante. Este problema se lo puede solucionar de dos maneras :

a) Calculando el potencial para $z = 0$, el mismo que dará el potencial en la superficie del terreno alrededor del electrodo.

$$V_o = \rho \frac{I}{2 \pi l} \ln \frac{2l}{a} \quad \text{Si } l^2 \gg a^2 \quad (40)$$

$$\sigma V_o = \rho \frac{I}{2 \pi l} \text{Arc Sen h } \frac{l}{a} \quad (41)$$

b) Aplicando el método de Howe del potencial medio

$$V_{om} = \rho \frac{I}{2 \pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad \text{Si } 2l \gg a \quad (42)$$

La resistencia de puesta a tierra del electrodo se obtiene al dividir el potencial del electrodo entre la corriente inyectada, obteniéndose :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi l} \ln \frac{2l}{a} \quad (43 a)$$

$$R = \frac{\rho}{2 \pi l} \text{Arc Sen h } \frac{l}{a} \quad (43 b)$$

$$R = \frac{\rho}{2 \pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad (43c)$$

Las tres expresiones son válidas y la diferencia al emplear cualquiera de las tres fórmulas es menor al 6 %.

Para el caso general en que el electrodo se encuentra enterrado a una profundidad h (Figura 29), el potencial en la superficie del terreno alrededor del electrodo es :

$$V = \rho \frac{I}{2 \pi l} \ln \frac{l}{a} \sqrt{\frac{3l + 4h}{l + 4h}} \quad (44)$$

y la resistencia será :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi l} \ln \frac{l}{a} \sqrt{\frac{4h + 3l}{4h + l}} \quad (45)$$

2.1.2.2 Electrodos Verticales en Paralelo

El procedimiento a seguir para la determinación de los parámetros eléctricos de estos modelos es un poco complicado, por lo que tan sólo se darán los resultados, en los que se han empleado los siguientes símbolos :

D : Separación entre electrodos (metros)

α : Variable, donde $\alpha = \frac{L}{D \ln \frac{4L}{d}}$

R : Resistencia de puesta a tierra de un electrodo simple como el de la Figura 29.

Resistencia de puesta a tierra de dos electrodos en paralelo.

$$R_2 = R \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) \quad (46)$$

Resistencia de puesta a tierra de tres electrodos en paralelo.

$$R_3 = R \left(\frac{2 + \alpha + 4 \alpha^2}{6 - 7\alpha} \right) \quad (47)$$

Resistencia de puesta a tierra de cuatro electrodos en paralelo

$$R_4 = R \left(\frac{1 + 2\alpha + \alpha/\sqrt{2}}{4} \right) = \left(\frac{1 + \alpha(2.707)}{4} \right) \quad (48)$$

2.1.2.3 Electrodos Horizontales o Contrapesos

La resistencia de puesta a tierra de un contrapeso de longitud L , diámetro d y enterrado en un terreno de resistividad ρ a una profundidad h como en la Figura 30, puede ser calculada utilizando cualquiera de las siguientes ecuaciones :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \ln \frac{L^2}{hd} \quad (49)$$

$$\text{ó} \quad R = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \frac{L^2}{hd} \quad (50)$$

aunque otros autores como R.B. Dwight consideran :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} + \ln \frac{2L}{2h} - 2 + 2 \frac{h}{L} - \frac{h^2}{L^2} + \frac{h^4}{2L^4} \dots \right) \quad (51)$$

2.1.2.4 Contrapesos Compuestos

Son obtenidos al combinar dos o más contrapesos semejantes al descrito anteriormente. Las fórmulas analíticas para el cálculo de su resistencia de puesta a tierra son :

Resistencia de puesta a tierra de dos contrapesos simétricos á 180°

$$R = 0.366 \frac{\rho}{2L} \left(\log \frac{4L}{d} + \log \frac{L}{h} - 0.25 \right) \quad (52)$$

Resistencia de puesta a tierra de dos contrapesos simétricos á 90°

$$R = 0.366 \frac{\rho}{2L} \left(\log \frac{4L}{d} + \log \frac{L}{h} - 0.103 + 0.19 \frac{h}{L} \right) \quad (53)$$

Resistencia de puesta a tierra de tres contrapesos simétricos á 120°

$$R = 0.366 \frac{\rho}{3L} \left(\log \frac{4L}{d} + \log \frac{L}{h} + 0.465 - 0.18 \frac{h}{L} \right) \quad (54)$$

Resistencia de puesta a tierra de cuatro contrapesos simétricos á 90°

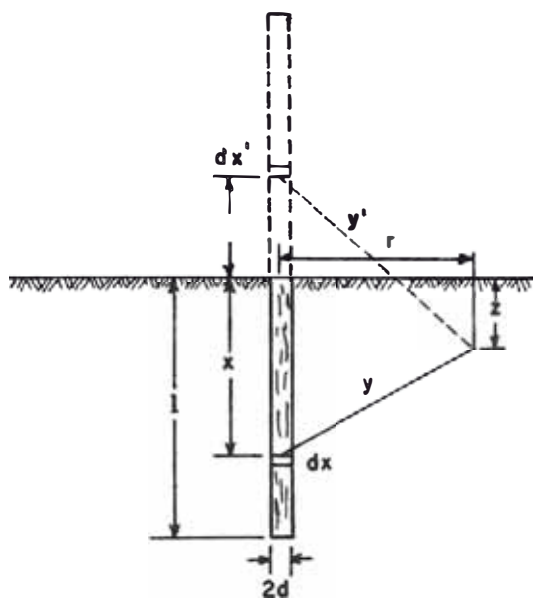


Figura 28.- Electrodo vertical enterrado a nivel del suelo

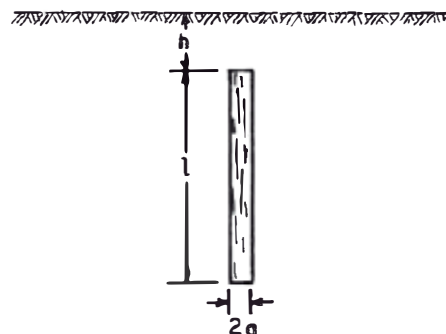


Figura 29.- Electrodo vertical enterrado a una profundidad h



Figura 30.- Electrodo horizontal

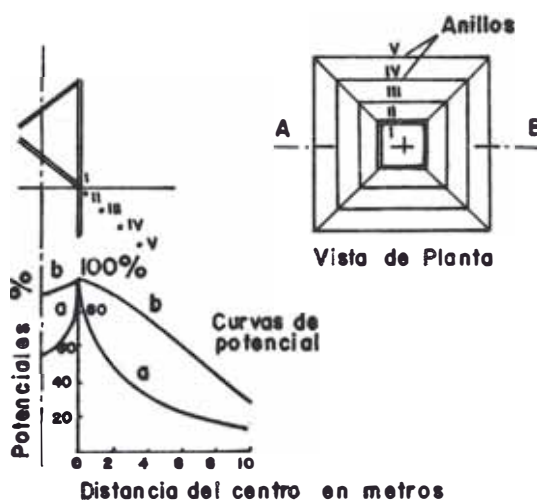


Figura 31.- Anillos concéntricos y distribución de potencial alrededor de una pata de la estructura en la dirección A-B: a) sin anillos y b) con anillos

$$R = 0.366 \frac{\rho}{4L} \left(\log \frac{4L}{d} + \log \frac{L}{h} + 1.265 - 0.93 \frac{h}{L} \right) \quad (55)$$

Resistencia de puesta a tierra de seis contrapesos simétricos á 60°

$$R = 0.366 \frac{\rho}{6L} \left(\log \frac{4L}{d} + \log \frac{L}{h} + 2.98 - 1.36 \frac{h}{L} \right) \quad (56)$$

2.1.2.5 Anillos Concéntricos

Este tipo de configuración es utilizado en zonas donde se de sea hacer una regulación del potencial, a fin de obtener tensiones de to que y paso dentro de los límites permisibles. En algunas oportunidades es te propósito no es logrado con un solo anillo, siendo necesario la coloca ción de anillos adicionales, cuya profundidad de enterramiento puede ir variando a medida que se aumenta el número de anillos, procurando colo car los más periféricos a mayor profundidad como se muestra en la Figura 31, donde también se observa la regulación de potencial alrededor de un apoyo.

En algunas oportunidades se acostumbra utilizar algunas varia ciones de este modelo, como son :

- Combinación de anillos concéntricos y brazos radiales en forma de contrapesos
- Conductores en forma de espiral alrededor de electrodos verticales

2.1.3 Programas Digitales para el Diseño de Puestas a Tierra en Líneas de Transmisión

A fin de obtener el diseño más óptimo de la puesta a tierra de los soportes de una línea de transmisión se puede hacer uso de progra mas digitales que permiten evitar el método corriente de cálculo tan poco económico y tedioso. Esta parte se tratará con mayor énfasis cuando se describan los métodos utilizados para el diseño de Subestaciones, concretán

donos por ahora a mencionar dos programas dirigidos exclusivamente a líneas de transmisión.

El primero de ellos, presentado por el Ing. Gonzalo Bardales en su Tesis de Grado en la Universidad Nacional de Ingeniería, está encaminado al diseño de la puesta a tierra para tres situaciones específicas, según la ubicación de las estructuras :

- a) Para zonas de circulación frecuente
Verifica la tensión de toque y paso
- b) Para zonas próximas a carreteras
Verifica la tensión de paso
- c) Para zonas de circulación reducida
Verifica el valor de resistencia máxima a ser detectada por los relés y en caso de zonas con elevado nivel isoceraúnico, la resistencia máxima para evitar un contorno inverso.

Este programa optimiza el diseño variando la profundidad de enterramiento, longitud, diámetro, configuración y distanciamiento entre electrodos, tomando en cuenta las limitaciones físicas del terreno donde está ubicada la estructura. En forma paralela, también calcula el costo del sistema de puesta a tierra.

El segundo programa considerado, es el presentado por F. Dawalibi y W.G. Finney (24), quienes han hecho un análisis computacional detallado del comportamiento de la puesta a tierra de una estructura típica de una línea de transmisión de 735 kV, a partir del cual han obtenido gráficos de curvas universales que pueden ser usadas para determinar la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y paso en la base de una torre de acero similar a la utilizada en su análisis. Si las dimensiones de la torre o la resistividad son diferentes a las tomadas como base en el análisis, pueden ser usadas ciertas fórmulas de conversión.

2.2 PUESTAS A TIERRA DE ESTACIONES TRANSFORMADORAS

2.2.1 Modelo Básico de Puesta a Tierra

El modelo básico de puesta a tierra en las estaciones transformadoras es el obtenido por la combinación de conductores enterrados horizontalmente formando una malla y electrodos enterrados verticalmente en lugares apropiados dentro de la malla. El amplio uso de este modelo es debido a las siguientes ventajas :

- a) Una malla es la manera más práctica para controlar los potenciales locales, sobre todo en sistemas donde la máxima corriente de falla a tierra es muy alta y resulta difícil obtener una resistencia de puesta a tierra baja, capaz de garantizar potenciales de tierra tolerables.
- b) Una malla es el mejor sistema para proporcionar la conductividad y capacidad de transporte y dispersión de corriente necesarios en los sistemas de puesta a tierra, para altas corrientes de cortocircuito, cosa que es poco posible obtener con los electrodos simples ordinarios.

Cabe mencionar que algunos diseños consideran tan sólo el uso de una malla; sin embargo, los electrodos verticales pueden ser de gran valor si la resistividad de la capa superior del suelo en que la malla está enterrada, es de mucha más alta resistividad que la segunda capa o si esto puede llegar a suceder debido al secado o congelamiento del terreno superficial.

2.2.2 Métodos Clásicos de Cálculo

2.2.2.1 Método de Laurent y Niemann

Es el método conocido más simple para el cálculo de un sistema de puesta a tierra y usa una modificación de la fórmula para un elec

trodo en forma de un plato circular, agregando en segundo término como sigue :

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (57)$$

donde :

- ρ : Resistividad en Ohm - m
 r : Radio en metros de un plato circular teniendo la misma área que la ocupada por el área de la malla
 L : Longitud total del conductor enterrado en metros

El segundo término considera la realidad que la resistencia de una malla es mayor que la de un plato sólido, y que esa diferencia disminuye cuando la longitud del conductor aumenta, llegando a ser cero cuando se trata de un plato sólido.

2.2.2.2 Método de Schwarz

Mediante este método se logra un cálculo más exacto que con el método anterior, e involucra un proceso dividido en tres partes.

a) Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de la malla

$$R_{11} = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a_1} + K_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - K_2 \right) \quad (58)$$

donde :

- ρ : Resistividad del terreno, en Ohm - centímetros
 L : Longitud total del conductor en centímetros
 a_1 : $\sqrt{a \times 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad de h centímetros, o
 a_1 : a para conductores en la superficie del terreno
 $2a$: diámetro del conductor, centímetros
 S : área cubierta por el conductor, centímetros cuadrados
 k_1, k_2 : Coeficientes que dependen de la configuración de la malla

Los valores k_1 y k_2 se han obtenido en gran parte en forma experimental en modelos de estudio y existen gráficos especiales para su determinación. Sin embargo, una aceptable aproximación de estos coeficientes para mallas rectangulares son los siguientes :

$$k_1 = 1.43 - \frac{2.3h}{S} - 0.044 \frac{A}{B} \quad (59)$$

$$k_2 = 5.50 - \frac{8h}{\sqrt{S}} + \left(0.15 - \frac{h}{\sqrt{S}}\right) \frac{A}{B} \quad (60)$$

donde A es el lado mayor de la malla y B el lado menor. Si la malla no es de forma rectangular puede aproximarse a esta condición sin errores de importancia.

b) Cálculo de la Resistencia de Las Jabalinas

$$R_{22} = \frac{\rho}{2\pi n L_1} \left\{ \ln \frac{4L_1}{b} - 1 + \frac{2k_1 L_1}{\sqrt{S}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right\} \quad (61)$$

donde :

- L_1 : Longitud de cada jabalina, cm
- $2b$: Diámetro de cada jabalina, cm
- n : Número de jabalinas en el área S

c) Cálculo de la Resistencia Combinada de La Malla y Las Jabalinas

$$R = \frac{R_{11} R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}} \quad (62)$$

donde :

- R_{12} : Resistencia mutua entre el reticulado y el conjunto de jabalinas, la cual viene dada por :

$$R_{12} = R_{21} = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{L_1} + k_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - k_2 + 1 \right) \quad (63)$$

Simplificando :

$$R_{12} = R_{11} - \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{L_1}{a_1} - 1 \right) \quad (64)$$

2.2.3 Método de la IEEE - Std 80

El procedimiento recomendado por este método es descrito en los siguientes pasos :

- a) Investigación de las Características del Suelo
- b) Determinación de la Máxima Corriente de Falla a Tierra

En este punto se deben considerar los efectos que puedan generar futuras ampliaciones, la resistencia de falla, el cable de guarda, el factor de decremento, etc.

- c) Diseño preliminar del Sistema de Puesta a Tierra

Comprende todo lo relacionado a la configuración geométrica tentativa del reticulado, así como también la elección de los materiales a ser utilizados en la puesta a tierra. En esta parte se calcula la longitud de conductor requerida para el control de los gradientes dentro de los límites de seguridad, a partir de la ecuación (68) obtenida de la siguiente manera .

Entre los potenciales locales (toque, paso y malla), la más peligrosa es la tensión de malla E_m dada por :

$$E_m = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \quad (65)$$

donde :

- K_m : Coeficiente que toma en cuenta el efecto del número de conductores en paralelo n , el espaciamiento entre conductores D , el diámetro del conductor d y la profundidad de enterramiento h de los conductores de la malla.

La magnitud de K_m en términos de estos factores es :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots \text{etc.} \quad (66)$$

El número de los factores entre paréntesis en el segundo término de la ecuación (66) es dos menos que el número de conductores en paralelo de la malla básica.

K_i : Factor de corrección de irregularidad, que toma en cuenta la no uniformidad del flujo de corriente en las diferentes partes de la malla. Puede ser determinado a partir de los datos experimentales de Koch o también a partir de la curva empírica siguiente :

$$K_i = 0.65 + 0.172 n \quad (67)$$

ρ : Resistividad promedio del terreno, en Ohm - metros

I : Corriente total máxima rms de falla a tierra, en amperios

L : Longitud total del conductor enterrado, en metros.

Igualando la tensión de malla dada por la ecuación (65) con el máximo valor tolerable de tensión de toque de la ecuación (35 a) y considerando terreno uniforme ($C = 1$), podemos despejar el valor de L , que nos dará la longitud aproximada de conductor enterrado requerido para mantener la tensión de malla dentro de los límites de seguridad.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho_s} \quad (68)$$

donde :

ρ_s : Resistividad de la capa superficial del terreno inmediatamente debajo de los pies, en ohm - metros.

t : Duración máxima del choque, en segundos

d) Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra

Se recomienda hacer un cálculo preliminar utilizando el

método de Laurent y posteriormente cuando se logre la configuración definitiva del reticulado, se puede hacer un cálculo más refinado utilizando el método de Schwarz.

e) Cálculo de la Máxima Elevación de Potencial de La Malla

La máxima elevación de potencial de la malla con respecto a tierra remota va a ser $E = IR$, donde R es la resistencia de puesta a tierra del reticulado.

f) Cálculo de la Tension de Paso en la Periferie de la Malla

El chequeo de la máxima tensión de paso que puede ocurrir en el perímetro de la malla se hace a través de :

$$E_{\text{paso}} = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \quad (69)$$

donde :

K_s : Coeficiente que toma en cuenta el efecto del número n , espaciamiento D y la profundidad de enterramiento h de los conductores de la malla. Su valor está dado por :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right) \quad (70)$$

El número total de términos entre paréntesis es igual al número de conductores en paralelo del reticulado básico.

El valor de la tensión de paso obtenido, debe ser comparado con el valor tolerable dado por la ecuación (34a).

g) Cálculo de las Tensiones de Toque y Paso Internas

Estos potenciales van a encontrarse dentro de los límites tolerables si es que se emplea por lo menos la longitud de conductor

calculada en la ecuación (68). Todo lo tratado hasta ahora es válido para casos de falla, pero cuando se trata de una corriente duradera, se debe hacer un chequeo del valor de corriente que puede fluir a tierra sin sobrepasar la magnitud de corriente soportada por una persona en forma permanente y sin peligro : 9 miliamperios para el hombre y 6 miliamperios para la mujer. Esta corriente se obtiene de la siguiente manera :

$$K_m K_i \rho \frac{I}{L} < (1000 + 1.5 \rho_s) \frac{9}{1000} \quad (71)$$

$$I = \frac{(1000 + 1.5 \rho_s)}{K_m K_i \rho} \times L \times \frac{9}{1000} \quad (72)$$

La I calculada servirá a la vez para la calibración de los relés.

h) Investigación de los Potenciales Transferidos

Comprende el análisis de los efectos que puedan tener en la creación de potenciales peligrosos ciertos dispositivos como son los circuitos de comunicación, rieles, conductores neutros de baja tensión, equipos portátiles e instrumentos alimentados desde la Subestación, tuberías, etc.

i) Investigación de Puntos Peligrosos Especiales

Estos puntos peligrosos son las vallas o cercas, las manijas de operación, la puesta a tierra del apantallamiento de los cables, la puesta a tierra de los pararrayos, etc.

j) Corrección o Refinamiento del Diseño Preliminar

Consiste en la adopción de ciertas correcciones, en el caso que con el diseño inicial no se hayan logrado obtener los potenciales tolerables.

2.2.4 Métodos para el Uso de Computadora

Permiten evitar muchas asunciones y aproximaciones que son necesarias cuando se analiza una puesta a tierra con los métodos tradicional

les; aunque la mayoría de estos programas están basados en los conceptos fundamentales de las ecuaciones usadas en el pasado. Por lo general, los métodos para el uso de la computadora han sido orientados al cálculo de los gradientes de potencial en cualquier punto de la superficie de los electrodos o del terreno, gracias a su capacidad para calcular el flujo no uniforme de la corriente en las diferentes partes del sistema de puesta a tierra y pueden ser aplicados a cualquier tipo de configuración y ubicación de la malla de puesta a tierra. Dentro de la variedad de métodos se mencionará a tres de ellos :

2.2.4.1 Método de Dawalibi - Mukhedkar

Los autores han realizado múltiples estudios dirigidos al uso de la computadora en el análisis del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra. El resultado de todos estos estudios ha sido el desarrollo del programa MALT, capaz de manejar redes de puesta a tierra teniendo una configuración geométrica ya sea simétrica o irregular y enterradas en un terreno de resistividad uniforme o con un modelo de dos capas.

Una aplicación del Programa MALT puede ser observado en el artículo de los mismos autores titulado : Análisis Paramétrico de Mallas de Puesta a Tierra (7), en el cual se analiza en detalle el comportamiento de diversas configuraciones de mallas, enterradas en terrenos con un modelo de dos capas.

2.2.4.2 Modelo de Heppe (6)

Es un método simple, directo y fácil de programar, basado en el cálculo matricial, a pesar de lo cual el tiempo de cómputo y requerimientos de memoria son relativamente modestos. Todas estas cualidades se cumplen debido a que el método está elaborado para mallas con una configuración simétrica, lo cual le quita cierto mérito, ya que en la práctica los sistemas de puesta a tierra van a ser en la mayoría de los casos de for

ma irregular.

Este método computa los efectos de la variación de la densidad de corriente de dispersión causada por la proximidad de conductores paralelos, conductores cruzados, conductores en ángulo y los efectos de los terminales de los conductores, con lo cual se puede calcular eficientemente los voltajes superficiales en la vecindad de los sistemas de puesta a tierra, así como también la resistencia de puesta a tierra.

Otra dificultad que se presenta en este método, son los errores de redondeo que pueden ser catastróficos en los procesos numéricos involucrados durante los cálculos digitales; aun más, las correcciones propuestas por Heppel no eliminan completamente estos problemas, por lo que algunos autores han propuesto un nuevo juego de ecuaciones equivalentes a las de Heppel (26), las que evitan algunos de los peligros mencionados.

2.2.4.3 Método de Kouteynikoff

Kouteynikoff ha desarrollado un método computacional propio, cuya originalidad e interés radica en la cuidadosa atención dada al cálculo de los coeficientes de acoplamiento resistivo entre los segmentos de los electrodos, dando lugar a valores precisos de resistencia de puesta a tierra y potenciales, aunque a costa de una mediana capacidad de memoria de la computadora. El proceso de cálculo a diferencia de otros métodos, involucra no solo una, sino dos fragmentaciones sucesivas en segmentos lineales de los electrodos estudiados. Los resultados obtenidos por Kouteynikoff han sido comparados con los obtenidos por el método desarrollado por Dawalibi y Mukhedkar, así como también con modelos a escala sumergidos en medios electrolíticos, dando resultados casi idénticos.

La principal limitación de este método es haber asumido un terreno homogéneo, aunque según el autor es fácilmente adecuado a terrenos estratificados si se hacen algunos arreglos.

2.3 PUESTAS A TIERRA DE EDIFICACIONES ESPECIALES

2.3.1 Puesta a Tierra de Centrales Eléctricas

Diseñar el sistema de puesta a tierra de una Central Eléctrica resulta en cierto modo un poco dificultoso, debido a los diversos ambientes con que cuenta el Complejo Eléctrico, mucho más si está ubicada en un terreno de resistividad elevada. Los principales objetivos buscados en el diseño de puesta a tierra de una Central son los siguientes :

- Seguridad del Personal
- Eficiente Operación de los Relés de Protección

A fin de lograr lo mencionado anteriormente, es necesario obtener un valor mínimo de resistencia de puesta a tierra (1 ohmio en la Central Restitución), así como también valores tolerables de las tensiones de toque y paso según lo anotado en el Acápite 1.4.4.4.

Entre las diferentes clases de centrales, resulta interesante analizar la modalidad de puesta a tierra de una central Hidroeléctrica, por las características especiales con que cuenta cada uno de sus ambientes. Los cálculos y verificaciones de los diversos parámetros eléctricos pueden efectuarse empleando los métodos tradicionales o programas digitales, aunque en casos especiales se darán ciertas pautas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

2.3.1.1 Casa de Máquinas

Los elementos que contribuyen a la puesta a tierra de la casa de máquinas son :

- a) Conductores de puesta a tierra enterrados en el piso de concreto de los diferentes niveles de la edificación: Piso de máquinas, piso de generadores, piso de turbinas, piso de inyectores, etc.

en cada uno de los cuales se formará una malla que irá interconectada con la de los otros niveles.

b) Varillas metálicas para soportar el techo de la casa de máquinas, las cuales conforman una red de electrodos múltiples, enterrados en el piso en su parte inferior.

c) Conductos de acero en contacto con el agua, como los ubicados en la porción inferior de la tubería forzada, la carcasa de la turbina y la porción superior del canal de descarga, que en caso de estar sobre un terreno de alta resistividad tienen como camino de más baja resistencia con respecto a tierra remota, el agua de la tubería forzada que va hasta la Chimenea de Equilibrio o a la Presa de la Central. La resistencia de puesta a tierra puede ser calculada considerando a la columna de agua como un conductor cilíndrico (27), cuya ecuación se muestra a continuación:

$$R = \frac{\rho l}{\pi r^2} \quad (73)$$

donde :

- l : Longitud de la tubería (metros)
- r : Radio de la tubería (metros)
- ρ : Resistividad del agua (ohmios - metro)

Esta ecuación da la resistencia de puesta a tierra de un solo grupo, por lo que habrá que considerar la contribución de los otros grupos en paralelo.

2.3.1.2 Canal y Cámara de Descarga

Para el Canal de Descarga se considera el uso de conductores de Cobre embebidos en el concreto de cada canal y en el caso de la Cámara de Descarga también se pueden utilizar estos dispositivos, formando una malla que irá embebida en su estructura.

2.3.1.3 Estructura de la Presa

Los elementos que contribuyen al sistema de puesta a tierra de la Presa son :

- a) Conductores de aterramiento embebido en el concreto de la Presa formando una malla vertical.
- b) Rejillas de acero en permanente contacto con el agua del Embalse.
- c) Conductores tendidos en el fondo del Embalse y conectados a la malla vertical de la Presa.

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de cada uno de estos arreglos, se recomienda el procedimiento propuesto en el artículo (27) de la Bibliografía.

2.3.1.4 Patio de Llaves

El sistema de puesta a tierra del Patio de Llaves puede diseñarse en forma semejante al de una Subestación.

2.3.1.5 Puestas a Tierra Adicionales

Cuando la Central se encuentra en un terreno de alta resistividad y no se ha logrado obtener la resistencia de puesta a tierra requerida, es necesario implementar ciertas correcciones o puestas a tierra adicionales, entre las cuales se pueden mencionar :

- a) Ejecución de un sistema de puesta a tierra en un terreno de baja resistividad, ubicado cerca a la Central y cuya configuración dependerá de las características del terreno.
- b) Utilización del lecho de los ríos para la colocación de un sistema de puesta a tierra, que podría estar constituido

do por electrodos en forma de tubos de acero, con un diámetro suficiente para no ser arrastrados por la corriente del río e interconectados formando una malla.

2.3.2 Puestas a Tierra de Estaciones de Comunicación

Los objetivos buscados al hacer la Puesta a Tierra de una Estación de Comunicación, ya sea de Radio, Televisión, Microondas, etc., son los siguientes :

- a) Proporcionar una resistencia de puesta a tierra lo más baja posible, para el buen funcionamiento y protección de los equipos receptores, transmisores, repetidores, etc.
- b) Proteger a los instrumentos de las descargas atmosféricas, en caso de estaciones ubicadas en lugares con gran frecuencia de estos fenómenos.

El modelo de puesta a tierra a utilizar, depende principalmente del área disponible, resistividad del terreno y características topográficas de la ubicación de la estación, lo que permitirá escoger un modelo de electrodos simples, o una combinación de estos electrodos, como se hace en las Subestaciones de Transformación. Los cálculos necesarios para el diseño se hacen siguiendo los procedimientos indicados anteriormente, según el modelo de puesta a tierra que se escoja.

El valor de la resistencia de puesta a tierra requerida en estos casos es variable, dependiendo de las exigencias de los equipos utilizados en la estación, que por lo general requieren menos de cinco ohmios (Estación Transmisora de Panamericana Televisión - Morro Solar). Estos valores mínimos de puesta a tierra, resultan difíciles de obtener en las estaciones repetidoras, que por sus características de funcionamiento deben estar ubicadas en la cima de los cerros, donde ocurren frecuentes descargas atmosféricas y el terreno tiene resistividad elevada. La manera de lograr

una buena puesta a tierra en estos casos, será mostrada más adelante en el Capítulo de Correcciones.

Para Estaciones Repetidoras es necesario considerar el uso de dos sistemas de puesta a tierra, uno de ellos para la protección del equipo de comunicación y el otro para el pararrayos. La separación entre ambos sistemas, debe ser tal que no exista alguna influencia mutua entre ambos sistemas, ya que la caída de un rayo en el pararrayos podría afectar al equipo de la estación.

2.3.3 Puestas a Tierra de laboratorios

En el diseño de la puesta a tierra de un laboratorio, se debe considerar siempre la utilización de dos sistemas independientes, que son mencionados a continuación :

- a) Para protección desde el punto de vista de seguridad del Personal (tierra de protección).
- b) Para seguridad del instrumental (tierra de instrumentación)

Según INVAP (28) los valores de resistencia de puesta a tierra para el sistema de protección del personal, deben ser como máximo de 3 ohmios y para el sistema de puesta a tierra de instrumentación, deben ser 1.5 ohmios como máximo. Estos dos sistemas de puesta a tierra deben estar separados y a una distancia no menor de 10 metros; siendo la separación con respecto al edificio o veredas mayor de 5 metros. Lo manifestado anteriormente está referido mayormente para laboratorios donde se utilizan tensiones y corrientes bajas, como son los laboratorios de Electrónica.

Para laboratorios de Alta Tensión, el diseño cambia ligeramente, ya que hay que considerar una red de tierra enterrada a lo largo de toda la superficie del laboratorio, tratando de garantizar tensiones de toque y paso tolerables.

También es necesario asegurar en este tipo de edificaciones una buena conexión a tierra de todas las partes metálicas no conductoras de los equipos, máquinas, herramientas, tableros; así como también las divisiones y enrejados metálicos.

2.3.4 Puestas a Tierra de Instalaciones Industriales

Los objetivos buscados al hacer el diseño de la puesta a tierra en las edificaciones para instalaciones industriales, son los siguientes

- a) Asegurar inmunidad contra las exposiciones de voltajes peligrosos, a las personas que se encuentren dentro del área de la instalación.
- b) Proveer una conducción de corriente adecuada, tanto en magnitud como en tiempo, capaz de aceptar la corriente de falla permitida por el sistema de protección de sobrecorriente, sin crear un incendio o peligro de explosión en el edificio.
- c) Contribuir a un mejor comportamiento del sistema eléctrico.

En las instalaciones industriales, se debe tener especial cuidado en las conexiones a tierra, ya que son una de las partes más importantes del sistema de puesta a tierra total, pudiendo resultar inadecuado en caso que las conexiones no sean realizadas correctamente y no tengan una baja resistencia.

La puesta a tierra para estos casos, puede ser hecha ya sea a través de electrodos existentes o a través de electrodos enterrados expresamente. El primer grupo comprende sistemas de tuberías metálicas subterráneas, armazones metálicos del edificio y otras estructuras metálicas subterráneas instaladas para otros propósitos diferentes a la puesta a tierra. El uso de la tubería metálica, es eficaz siempre y cuando dicha tubería reco

rra enterrada directamente en la tierra por lo menos cinco metros, hecho que en la actualidad es poco común por el creciente uso de tuberías plásticas.

Los electrodos usados deliberadamente, pueden ser electrodos verticales, cables enterrados horizontalmente, mallas, platos circulares, con trapeos, etc. El uso de cada uno de estos electrodos depende de las características de la instalación, resistividad del terreno y el valor de la resistencia de puesta a tierra que se quiera obtener.

Para un diseño óptimo de la puesta a tierra en estos casos, es necesario conocer y poner en práctica las disposiciones del Código Eléctrico del Perú, anotadas en su Capítulo VIII.

2.4 IMPEDANCIAS ESTATICAS Y DINAMICAS

A fin de facilitar la comprensión del comportamiento dinámico y estático de los sistemas de puesta a tierra, primeramente se enunciarán algunas definiciones importantes.

a) Resistencia Estática (R_0)

Es la resistencia de puesta a tierra del electrodo en estado estático (corriente continua) y puede ser calculada utilizando las ecuaciones descritas previamente, para cada tipo de electrodo en particular. Algunos autores consideran la resistencia estática, igual al valor de la resistencia a la frecuencia de generación (50 ó 60 Hz).

b) Impedancia Dinámica (Z_d)

Es la relación entre el valor instantáneo de la caída de potencial en el electrodo puesta a tierra y el valor instantáneo de la corriente inyectada.

$$Z_d = \frac{V}{i} \quad (74)$$

c) Impedancia de Impulso (Z_{imp})

Es la relación entre el valor pico del potencial desarrollado en el punto de alimentación y el valor pico de la corriente inyectada.

$$Z_{imp} = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (75)$$

Puede darse el caso, que el valor pico del potencial no se dé en el mismo momento que el valor pico de la corriente.

d) Coeficiente de Impulso (C_{imp})

Es la relación entre la impedancia de impulso y la resistencia estática en corriente continua o a la frecuencia de generación (50 ó 60 Hz).

$$C_{imp} = \frac{Z_{imp}}{R_o} \quad (76)$$

Según la literatura existente, el coeficiente de impulso puede variar entre 0.1 y 30, dependiendo de diversos factores que serán tratados seguidamente.

2.4.1 Factores que Influyen en la Impedancia Dinámica

a) La no linealidad de la impedancia del sistema de puesta a tierra, mientras ocurre la descarga de la corriente hacia el terreno. Esta no linealidad depende a la vez de ciertos parámetros, destacando :

- Las dimensiones y la geometría del electrodo de puesta a tierra (longitud, diámetro, modo de instalación, etc.) que determinan la inductancia del electrodo y la densidad de descarga de la corriente.
- Los parámetros de la onda de corriente de impacto tales como el valor pico, la máxima pendiente, el tiempo de descarga, etc.

- Distribución de la corriente de impulso en el sistema de puesta a tierra, que depende del punto donde entra la corriente al sistema y la reactancia del electrodo de puesta a tierra.
- b) Características del terreno donde se realiza la puesta a tierra, como son la resistividad eléctrica, la permeabilidad y la permitividad del terreno.

2.4.2 Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Puesta a Tierra

2.4.2.1 Corrientes de Conducción y de Desplazamiento

A fin de analizar el comportamiento dinámico de los sistemas de puesta a tierra de una manera más exacta, es necesario considerar en forma conjunta el flujo de las corrientes de conducción y de desplazamiento, causantes de las componentes inductiva y capacitiva del sistema. En la mayoría de los estudios realizados sobre este tema, tan sólo se ha venido tomando en cuenta las corrientes de conducción, dejando de lado las corrientes de desplazamiento, que siguen la misma dirección y sentido de las corrientes de conducción.

El principal efecto de la inductancia es aumentar la impedancia de impulso, hecho que puede ser compensado a la vez por la capacitancia. Investigaciones realizadas tomando en cuenta tan sólo el efecto de las corrientes de desplazamiento (29), muestran resultados de impedancia de impulso menores que la resistencia estática, aseveración que es censurada por ciertos investigadores que atribuyen estos resultados a la omisión de la componente inductiva del sistema de puesta a tierra, aparte que las corrientes de desplazamiento intervienen solamente a frecuencias y resistividades del terreno elevadas.

2.4.2.2 Mecanismos de la Corriente de Conducción

El caso de las corrientes de conducción puede ser explicado por dos mecanismos diferentes: El primero está referido a la conducción lineal electrolítica y el otro al llamado mecanismo de la zona del canal (30). En la conducción electrolítica, el agua contenida en el suelo disuelve las sales, ácidos y álcalis para formar una solución coloidal y así convertirse en un medio conductor. Este tipo de conducción se produce cuando la densidad de corriente que fluye del conductor hacia el terreno y la intensidad de campo eléctrico son mínimos; pero cuando la corriente inyectada incrementa su magnitud, se genera cierto calor que aumenta la temperatura del suelo (Efecto Joule), dando lugar a la evaporación de la humedad y por lo tanto al incremento veloz de la resistividad y el campo eléctrico, causantes del segundo mecanismo de conducción.

El mecanismo de conducción a través de la zona del canal es un fenómeno no lineal, caracterizado por la formación de una zona de descargas alrededor de la superficie de los electrodos; primero en la forma de chisporroteos y luego cuando la intensidad del campo eléctrico se incrementa, en la forma de arcos continuos precedidos por chisporroteos, como se puede observar en las Figuras 32a y b). Debido a que la caída de tensión en la zona del canal es mucho menor que en el caso de la conducción electrolítica, es posible que esta zona cause un incremento aparente en las dimensiones (principalmente diámetro) del electrodo de puesta a tierra, con el resultado de una disminución de su impedancia, llegando en algunos casos a ser menor que el valor de la resistencia estática. La extensión de esta zona de descarga termina cuando la intensidad del campo eléctrico es menor que un valor crítico E_c , dependiente de la naturaleza del suelo, con el cual se puede calcular las dimensiones incrementadas del electrodo y por lo tanto la disminución de la impedancia (31).

2.4.3 Métodos para el Cálculo de la Impedancia Dinámica

La literatura existente muestra varios métodos dedicados al es

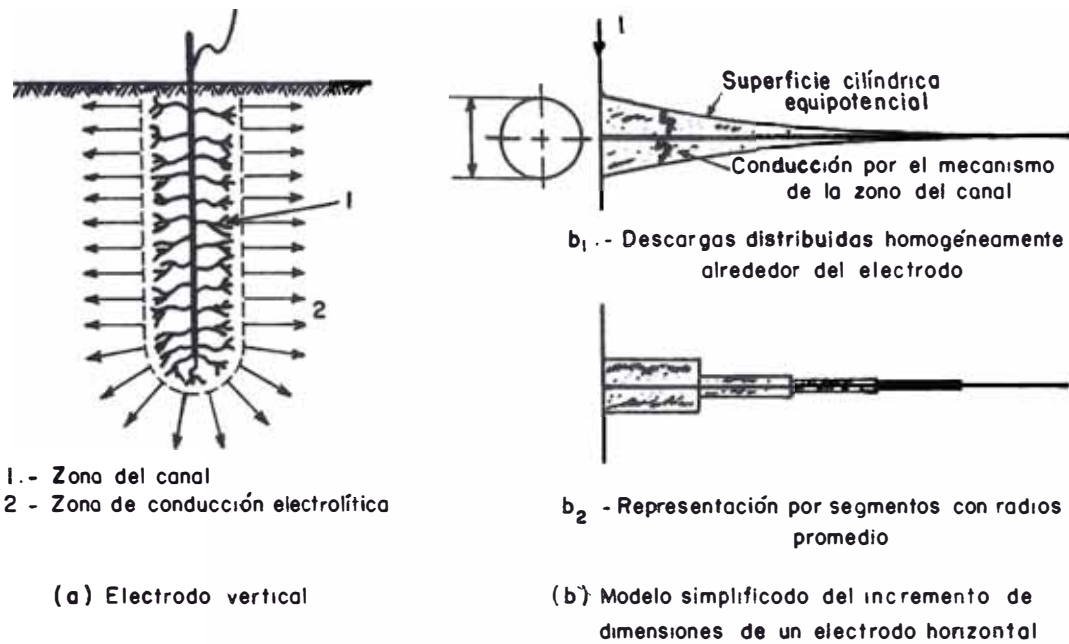
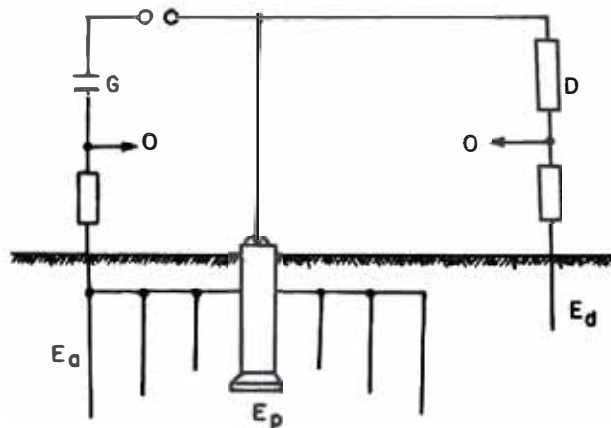


Figura 32.- Mecanismo de conducción a través de la zona del canal



- G Generador de impulsos
- Ep : Electrodo bajo prueba
- Ea : Electrodos de puesta a tierra auxiliares
- Sh . Shunt para medir la corriente de impulso
- D : Divisor de tensión
- Ed : Electrodo para poner a tierra el divisor de tensión
- O : Osciloscopio

Figura 33.- Circuito de Prueba de un electrodo de puesta a tierra

tudio y cálculo de la impedancia dinámica de los sistemas de puesta a tierra; por lo que tan solo se describirán algunos de ellos.

2.4.3.1 Método de la IEEE

La IEEE en su Standard N° 80 (1961) analiza el comportamiento dinámico de dos tipos de electrodos, el primero de ellos es un electrodo enterrado verticalmente, para el cual se proponen tres circuitos equivalentes, dependiendo del rango de tensión y frecuencia del impulso. El otro tipo de electrodo es un contrapeso, para el que se ha desarrollado una fórmula analítica con la cual se puede calcular su impedancia de impulso.

En este método se enuncian los conceptos fundamentales del comportamiento dinámico de los electrodos de puesta a tierra, sin embargo, necesita ser actualizado de acuerdo a las últimas investigaciones realizadas sobre este tema.

2.4.3.2 Método de Takashima, Nakae, Ishibashi

Utiliza el método de simulación de corriente junto con el método de imágenes, para calcular la distribución del campo eléctrico alrededor de los electrodos y las características de la impedancia de puesta a tierra, tomando en cuenta solamente las corrientes de desplazamiento. Como resultado de sus análisis, los autores proponen una expresión para inferir la impedancia dinámica de un electrodo a partir de su resistencia en corriente continua, lo mismo que la estimación de los errores de las impedancias calculadas para los tipos de electrodos analizados. Como es de esperarse los resultados obtenidos indican valores de impedancias dinámicas, menores que los valores de resistencia estática (27).

Como se ha mencionado anteriormente, la principal objeción de este método es el no haber considerado el efecto inductivo de la puesta a tierra, aparte que los resultados obtenidos son válidos solamente para

frecuencias altas de la onda de impulso, acompañadas de resistividades elevadas.

2.4.3.3 Método de Gupta, Thapar

Los autores han publicado una serie de artículos concernientes al comportamiento dinámico de los sistemas de puesta a tierra, destacando el referido a la impedancia de impulso de mallas de puesta a tierra (32), en el cual proponen un método para el cálculo de la inductancia a partir de investigaciones analíticas y fórmulas empíricas. También proponen algunas fórmulas para el cálculo del área efectiva de la malla y del coeficiente e impedancia de impulso.

Todos sus análisis los hacen considerando que la impedancia de impulso depende mayormente de la inductancia y que el efecto de ionización del suelo (conducción por la zona del canal) para mallas de Subestaciones de grandes dimensiones, es casi insignificante. Los resultados obtenidos para varios tipos de mallas, muestran coeficientes de impulso entre 1.006 y 1.840.

2.4.3.4 Método de Velasquez, Mukhedkar

Para analizar el comportamiento transitorio de los electrodos de puesta a tierra han desarrollado un programa digital, cuyos resultados son mostrados en su artículo (31). El algoritmo utilizado se basa principalmente en la partición del electrodo principal en segmentos (menores de 15 metros), a los cuales se les hace un análisis dinámico por separado, tomando en cuenta tanto el mecanismo de conducción electrolítico como el de la zona del canal. Este método está dirigido principalmente a electrodos enterrados horizontalmente y es uno de los más completos en cuanto se refiere al análisis del comportamiento dinámico de los electrodos de puesta a tierra.

2.4.4 Resultados de Investigaciones Experimentales

El comportamiento dinámico de los diversos modelos de puesta a tierra utilizados en la práctica, han sido estudiados experimentalmente por diversos investigadores, ya sea en modelos a escala o en casos casi reales, verificando los resultados obtenidos con los procedimientos analíticos y numéricos propuestos para cada caso.

2.4.4.1 Experiencias de Kosztaluk, Loboda y Mukhedkar

Los electrodos seleccionados para las experiencias fueron los soportes de concreto, utilizados comunmente como fundaciones para las líneas de transmisión. El circuito utilizado en las pruebas es mostrado en la (Figura 33), donde el Generador de Impulsos conectado entre el electrodo de prueba y el electrodo de puesta a tierra auxiliar, produjo corrientes de impulso de $3 - 12 \mu s$ y $15 - 40 \mu s$ con una cresta de onda alrededor de los 26 KA. El objeto de estas pruebas fue reproducir todas las condiciones y fenómenos que podrían ocurrir cuando una corriente de rayo descarga a través de un electrodo de puesta a tierra y a la vez simular corrientes semejantes a las que ocurren durante una descarga atmosférica, ya que al hacer pasar 26 KA por cada pata de la estructura, equivale aproximadamente a un total de 100 KA para las cuatro patas de la torre.

Los resultados de las pruebas pueden ser vistos en las Figuras 34, 35 y 36; de cuyas gráficas se puede inferir la formación de la zona del canal, la cual permite que la resistencia de puesta a tierra de un electrodo simple, como el de las fundaciones de concreto, sea reducido dos o tres veces su valor estático. También se demostró que corrientes de rayo típicas, como las usadas en la experiencia, no causan mayores daños a las fundaciones de concreto.

2.4.4.2 Experiencias de Fieux, Kouteynikoff y Villafranque

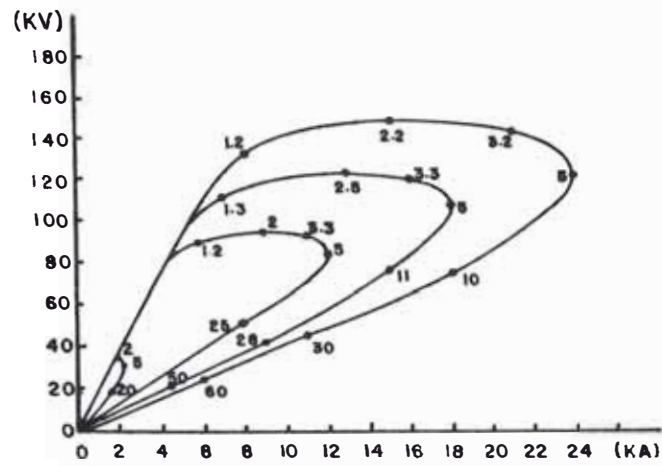


Figura 34.- Valor instantáneo del voltaje V en función del valor instantáneo de la corriente de impulso i
 Tipo de electrodo: Pata de una torre
 Tipo de suelo: Arcilloso
 Onda de impulso: $5/35 \mu s$
 Los numeros adyacentes a las curvas estan en μs

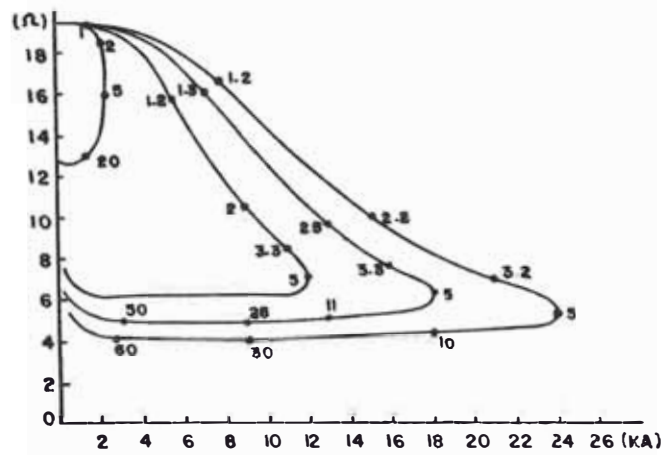


Figura 35.- Impedancia dinámica Z_d en función de la corriente de impulso i . Condiciones: Las mismas que para la Fig. 34

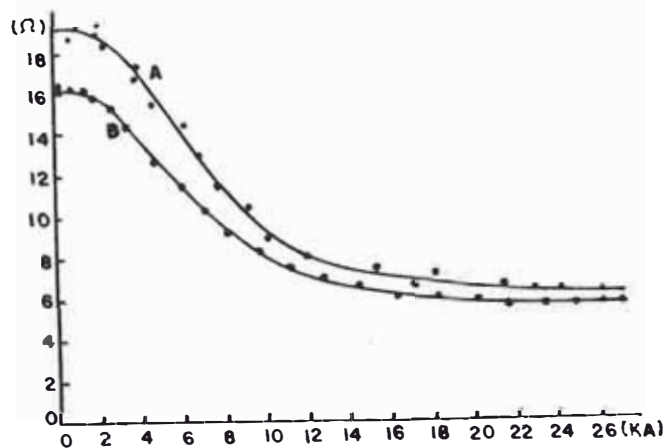


Figura 36.- Impedancia de impulso Z_{imp} en función del valor pica de la corriente de impulso i

Durante 1977 y 1978, los autores realizaron una serie de mediciones en la Estación de Investigación de St. Privat d' Allier (SPA), utilizando tres modelos diferentes de electrodos de puesta a tierra, a los cuales se les hizo pasar corrientes de rayo reales y luego se comprobaron las mediciones artificialmente empleando un generador de impulsos (33). Los tipos de electrodos analizados son mostrados en la Figura 37, mientras que en las Figuras 38 y 39, se muestran los resultados obtenidos en la experiencia, los que nos permiten expresar ciertas aseveraciones acerca del comportamiento dinámico de los electrodos en mención

- La impedancia dinámica de puesta a tierra tiende a incrementarse con la frecuencia, excepto para el electrodo hemisférico.
- Una clasificación de los electrodos analizados, tomando en cuenta el incremento de su impedancia a frecuencias elevadas es : Hemisferio, Doble Lazo, Contrapeso.
- La no existencia de indicios que muestren la ocurrencia del mecanismo de conducción a través de la zona del canal, a pesar que las corrientes fueron mayores á 20 KA podría ser la baja resistividad del terreno donde se realizaron los experimentos.

Una mejor interpretación de las mediciones efectuadas por estos investigadores, sería posible si se conocieran las características de la onda de corriente, resistividad eléctrica del terreno y un mayor detalle de las dimensiones y geometría de los electrodos utilizados.

2.4.4.3 Verificación del Método Velásquez - Mukhedkar

A fin de determinar la exactitud y aplicabilidad del método propuesto, se hizo un análisis del comportamiento dinámico de diferentes tipos de electrodos de puesta a tierra para diferentes parámetros de resisti


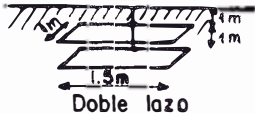

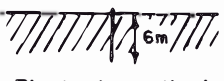
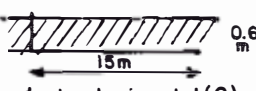
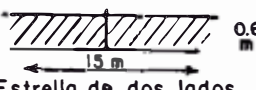
Tipo de puesta a tierra	Resistencia a baja frecuencia (Ohmios)	Descarga número	Aplicación de impulsos artificiales
 Hemisferio	11 a 14	7716	Si
 Doble lazo	12 a 14	7804,7806 7813	Si
 Conductor horizontal(1)	5 a 6	7803,7807	Si
 Electrodo vertical	9.5	-	Si
 Conductor horizontal(2)	8	-	Si
 Estrella de dos lados	8	-	Si

Figura 37.- Características de los electrodos estudiados por Fieux, Kouteynikoff y Villafronque

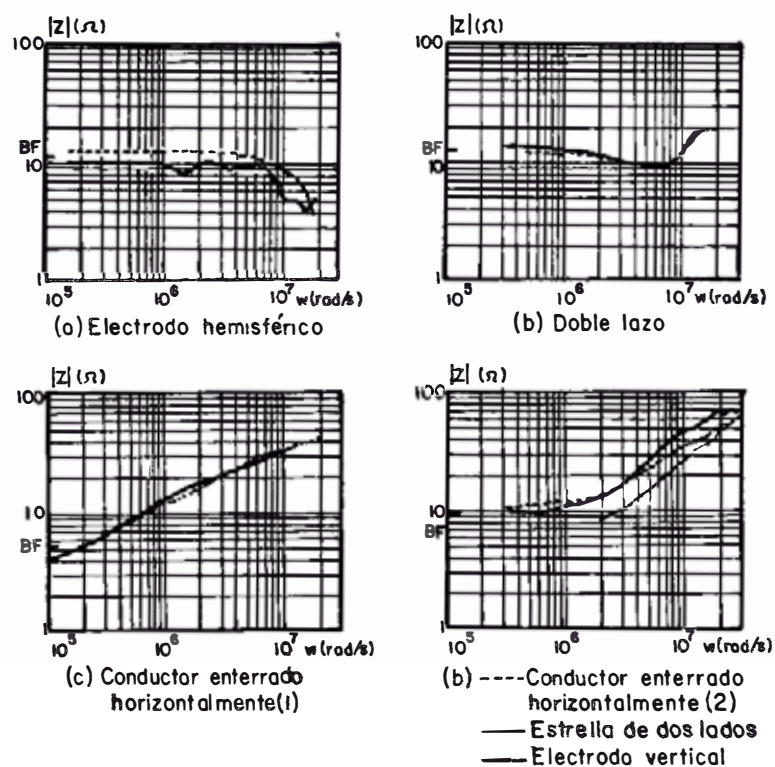
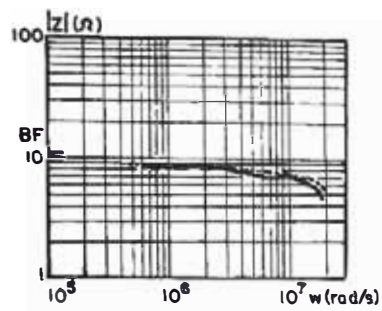
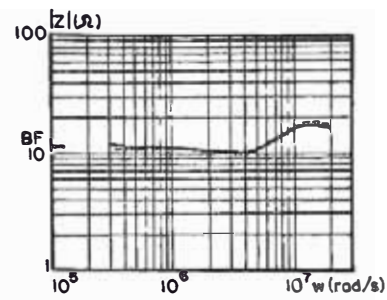


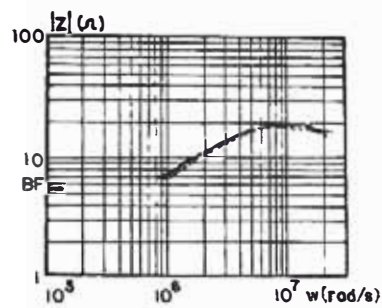
Figura 38.- Comportamiento de la impedancia de puesta a tierra ante impulsos de ondas artificiales



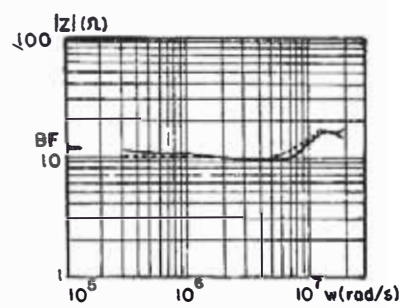
(a) Electrodo hemisférico
Descarga N° 7716



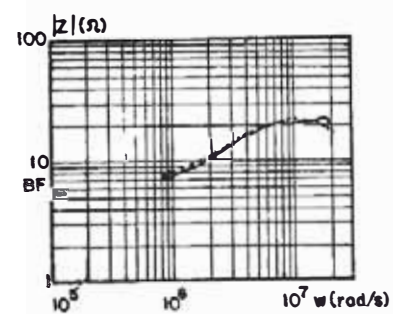
(b) Doble lazo
Descarga N° 7804



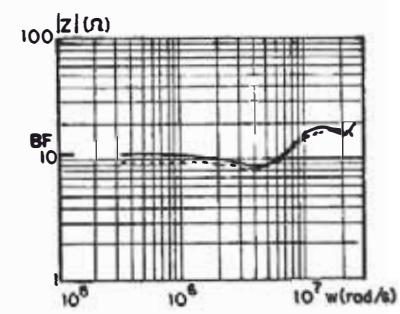
(c) Conductor horizontal (I)
Descarga N° 7803



(d) Doble lazo
Descarga N° 7806



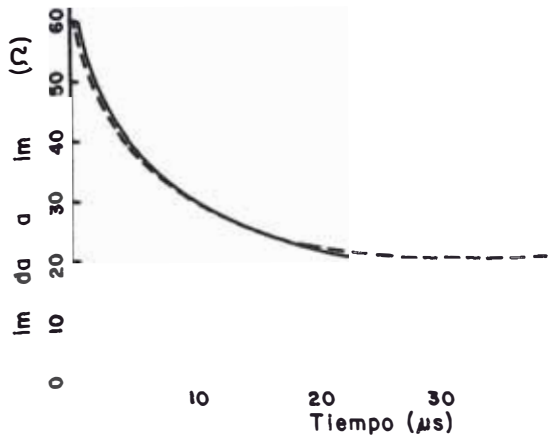
(e) Conductor enterrado
horizontalmente (I)
Descarga N° 7807



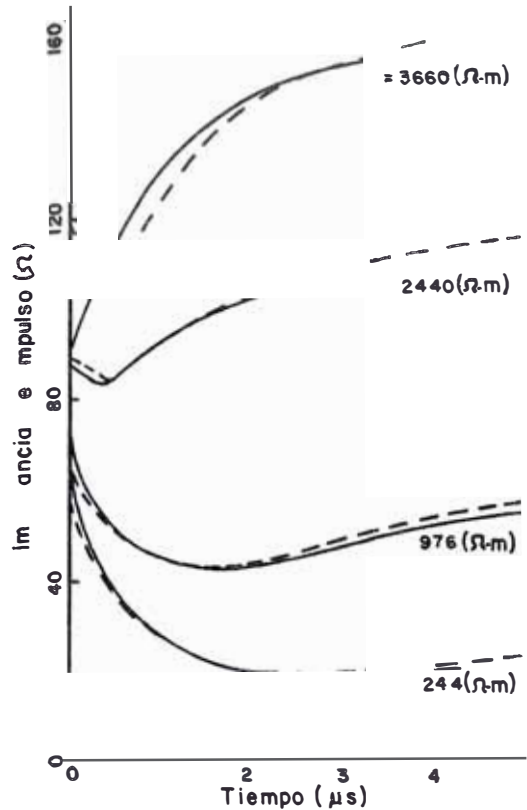
(f) Doble lazo
Descarga N° 7813

BF = Resistencia medida con instrumentos de baja frecuencia

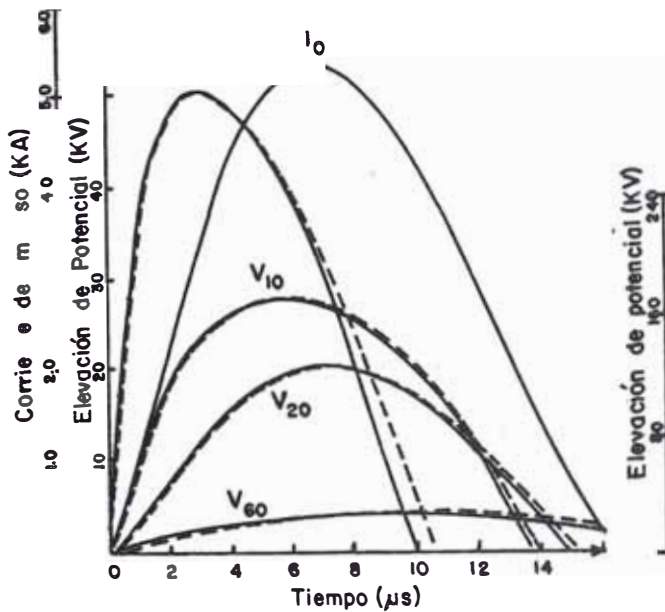
Figuro 39.- Comportamiento de la impedancia de puesta a tierra ante la ocurrencia de descargas atmosféricas



(a) Impedancia de impulso de un conductor horizontal extenso

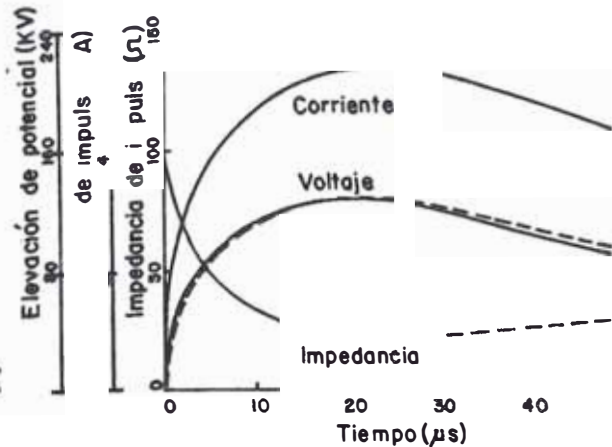


(c) Impedancia de impulso para impulsos de corriente de pequeña magnitud



(b) Distribución de potencial a lo largo del electrodo de puesta a tierra

Condiciones: (a) $l = 110 \text{ m}$ $\rho = 3000 \Omega\text{-m}$
 $a = 0.006 \text{ m}$ $E_c = 3.5 \text{ Kv/cm}$
 $h = 0.30 \text{ m}$
 (b) $l = 60 \text{ m}$ $\rho = 100 \Omega\text{-m}$
 $a = 0.005 \text{ m}$ $E_c = 2.8 \text{ Kv/cm}$
 $h = 0.60 \text{ m}$



(d) Impedancia de impulso y elevación de potencial para un electrodo vertical

(c) $l = 30 \text{ m}$ $\rho = \text{como se indica}$
 $a = 0.005 \text{ m}$
 $h = 0.30 \text{ m}$
 (d) $l = 2.16 \text{ m}$ $\rho = 310 \Omega\text{-m}$
 $a = 0.008 \text{ m}$ $E_c = 0.7 \text{ Kv/cm}$
 $h = 0.0 \text{ m}$

Figura 40.- Respuesta dinámica de diversos modelos de electrodos de puesta o tierra

vidad, longitud de los conductores y forma de onda de corriente aplicada. Los resultados experimentales usados como referencia para las comprobaciones, fueron tomados de diversas publicaciones anotadas en la Bibliografía proporcionada por los autores.

Las comparaciones entre los valores experimentales y calculados son mostrados en la Figura 40 a-d, las cuales muestran la gran exactitud del método propuesto y ratifican la gran dependencia del comportamiento dinámico de los electrodos de ciertos parámetros como son : Resistividad y permitividad del terreno, magnitud y forma de onda de corriente, dimensiones y geometría de los electrodos, etc.

2.4.4.4 Experiencias de Gupta y Thapar

La verificación del método analítico recomendado por los autores fué hecha en base a pruebas en modelos a escala, utilizando un tanque electrolítico hemisférico de 6 metros de diámetro y 16 mallas de 1 y 4 metros cuadrados cada una, hechas con conductor de Cobre N° 14 AWG. Los resultados experimentales y analíticos son mostrados en la Tabla V, en la que se puede observar que ambos resultados son muy semejantes, confirmando la validez del método teórico.

TABLA V

COMPARACION DE LOS RESULTADOS ANALITICOS Y EXPERIMENTALES

Dimensionamiento del Modelo	Resistividad del Electrodo Ohm - m	Punto de Alim.	Resistencia 60 Hz. Ohms	<u>Resultados Analíticos</u>		<u>Resultados Experimentales</u>	
				Imp. de Impulso Ohms	Coef. de Impulso	Imp. de Impulso Ohms	Coef. de Impulso
1 x 1m	19	Centro	9.5	9.55	1.006	10.3	1.08
1 x 1m	19	Esquina	9.5	10.2	1.074	10.9	1.15
2 x 2m	19	Centro	4.8	5.0	1.04	5.4	1.12
2 x 2m	19	Esquina	4.8	6.8	1.42	7.3	1.52
1 x 1m	7.2	Centro	3.7	3.79	1.025	4.15	1.12
1 x 1m	7.2	Esquina	3.7	4.6	1.246	5.1	1.38
2 x 2m	7.2	Centro	1.9	2.15	1.13	2.3	1.21
2 x 2m	7.2	Esquina	1.9	3.32	1.75	3.5	1.84

CAPITULO III

MEDICION Y ANALISIS DE LOS PARAMETROS ASOCIADOS

3.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO

La base fundamental para el diseño eficiente de un sistema de puesta a tierra es el conocimiento que se tenga de la resistividad del suelo, el cual deberá obtenerse a través de mediciones directas, evitando el uso de tabulaciones de carácter general encontradas frecuentemente en la literatura o de simples inspecciones oculares de la zona.

3.1.1 Métodos de Medición

3.1.1.1 Método de los Tres Electrodos

Básicamente consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de dimensiones conocidas, enterrado en un terreno cuya resistividad se desea conocer (Figura 41). El cálculo de la resistividad aparente a una profundidad dada, puede ser realizada utilizando cualquiera de las tres ecuaciones 43a, b, c; aunque C.J. Blattner (34) recomienda el uso de la ecuación 43c, a partir de la cual se obtiene.

$$\rho_a = \frac{2 \pi LR}{\ln \frac{4L}{r}} - 1 \quad (77)$$

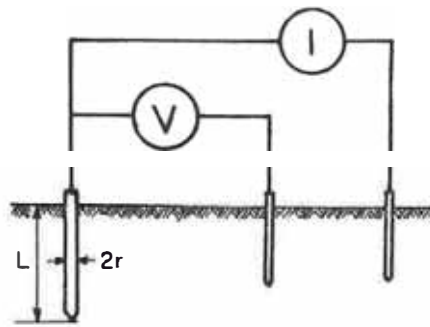


Figura 41.- Medición de resistividad por el método de los tres electrodos

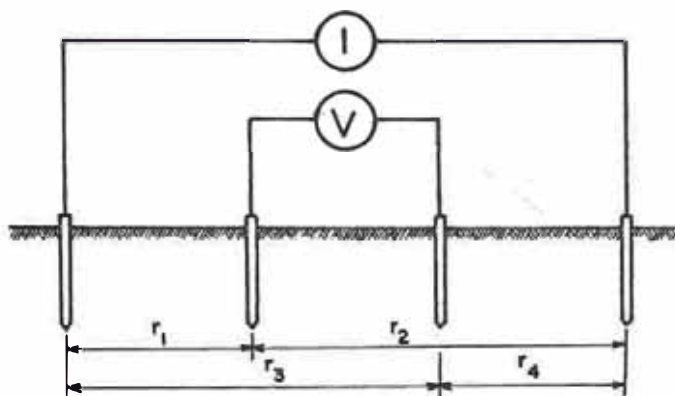


Figura 42.- Medición de resistividad por el método de los cuatro electrodos

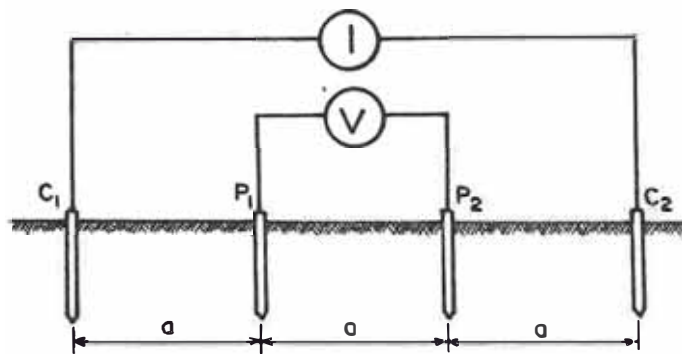


Figura 43.- Configuración de Wenner

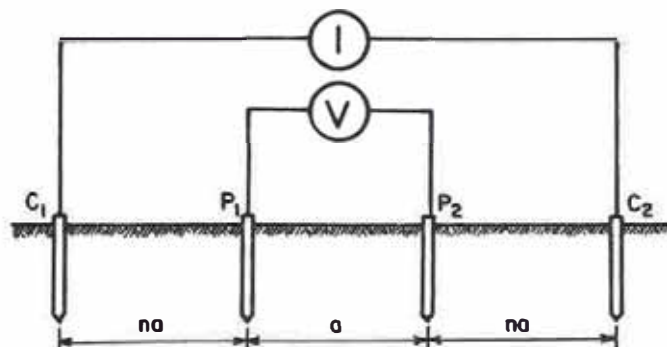


Figura 44.- Configuración de Schumberger

donde :

- ρ_a : Resistividad aparente para una profundidad L ($\Omega \cdot m$)
 L : Longitud del electrodo enterrado en contacto con el suelo (metros)
 2r : Diámetro del Electrodo (metros)
 R : Valor medido de la resistencia (ohmios)

Este método tiene muchas limitaciones, no obstante, actualmente es utilizado por algunas compañías, como se menciona en el artículo publicado por C.J. Blatner, donde hace una comparación de las mediciones de resistividad obtenidas con los métodos de tres y cuatro electrodos, tanto para terrenos homogéneos, como para terrenos de dos capas.

3.1.1.2 Método de los Cuatro Electrodos

El principio de este método está basado en la medición de la diferencia de potencial entre dos de los electrodos, luego de haber inyectado al terreno una corriente a través de los otros dos. La corriente inyectada puede ser corriente continua conmutada o corriente alterna de baja frecuencia (menores de 200 Hz) por razones de acoplamiento entre los conductores.

La ecuación fundamental para la medición de resistividad mediante cuatro electrodos, teniendo en cuenta la Figura 42, es :

$$\rho = \frac{2 \pi V}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad (78)$$

donde :

- V : Diferencia de potencial entre dos electrodos
 I : Corriente inyectada
 r_1, r_2, r_3, r_4 : Distancia entre los electrodos de acuerdo a la Figura 42.

Si el terreno considerado es homogéneo, el valor de la resistividad medida por este método corresponderá al var único de resist

tividad presente en el terreno; pero si no es homogéneo, entonces el valor obtenido será ficticio, llamándose Resistividad Aparente y se designa por ρ_a .

Existen varias configuraciones clásicas de este método, dependiendo de la forma relativa en que se ubiquen los electrodos.

A) Configuración de WENNER

Para esta configuración los cuatro electrodos se colocan en una línea recta, con igual separación y profundidad de penetración en el terreno (Figura 43). El método de medición está basado en la ecuación (79), desarrollada por el Dr. Frank Wenner, donde los electrodos 1 y 4 (externos) se utilizan para inyectar la corriente y los electrodos 2 y 3 (centrales) sirven para medir la diferencia de potencial, que al ser dividida por la corriente inyectada da un valor de resistencia R. Luego :

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (79)$$

o también :

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{n} \quad (80)$$

donde :

- ρ : Resistividad del terreno (ohmios - metro)
- R : Resistencia medida (ohmios)
- a : Distancia entre electrodos (metros)
- b : Profundidad de penetración de los electrodos (mets.)
- n : Factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2 (depende de la relación b/a)

La ecuación (80) puede aproximarse a :

$$\rho = 4 \pi a R \quad \text{Si } b \gg a \quad (81)$$

$$\rho = 2 \pi a R \quad \text{Si } b \ll a \quad (82)$$

En la configuración de Wenner, los electrodos de corriente (C) y los electrodos de Potencial (P), pueden tener 3 arreglos alternativos, sin alterar el resultado de la resistividad que se va a medir, siempre y cuando se aplique la expresión adecuada. Estos arreglos son mostrados en la Tabla VII, siendo el más frecuentemente utilizado para las mediciones el arreglo C - P - P - C.

TABLA VI

ARREGLOS ALTERNATIVOS EN LA CONFIGURACION
DE WENNER

$$\begin{array}{l}
 \text{C-P-P-C} \\
 \text{P-C-C-P} \\
 \text{C-C-P-P} \\
 \text{P-P-C-C} \\
 \text{C-P-C-P} \\
 \text{P-C-P-C}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \nearrow \\
 \nearrow \\
 \nearrow \\
 \nearrow \\
 \nearrow \\
 \nearrow
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \rho_1 = 2\pi a R_1 \\
 \rho_2 = 6\pi a R_2 \\
 \rho_3 = 3\pi a R_3
 \end{array}$$

La configuración de Wenner permite una visualización más rápida de la curva, ya que la resistividad puede ser obtenida en forma más directa a partir de los valores de resistencia R leídos en el instrumento. Por otro lado se pueden utilizar instrumentos menos sensitivos que en la configuración Schlumberger, ya que a medida que se alejan los electrodos de corriente también lo hacen los de potencial.

B) Configuración de SCHLUMBERGER

Para esta configuración los cuatro electrodos se colocan también en línea recta, manteniendo la separación entre electrodos centrales o de potencial (a) constante; mientras que los electrodos exte

riores varían su separación a partir de los electrodos interiores, a distancias múltiplos (na) de la separación base de los electrodos centrales (a), (Figura 44). La ecuación fundamental para este caso es :

$$\rho_{a_{sch}} = \tilde{\pi} R \cdot n(n + 1) a \quad (83)$$

Algunas de las ventajas de esta configuración son la rapidez con que se realizan las mediciones y la menor sensibilidad a las variaciones laterales del terreno, debido principalmente a que sólo se desplazan los electrodos de corriente, permaneciendo en su lugar los de potencial.

Estructura Equivalente del Suelo

3.1.2

En la mayoría de los casos, los terrenos presentan características de no homogeneidad, fenómeno que puede ser verificado a través de la interpretación de las mediciones de resistividad, las que permitirán determinar la representación del suelo a través de un modelo homogéneo o un modelo estratificado.

3.1.2.1 Suelo Homogéneo

El valor de la resistividad aparente medida para cualquier separación entre los electrodos se va a mantener constante y coincide con el valor de la resistividad del suelo.

3.1.2.2 Suelo Estratificado de Dos Capas

En este modelo de suelo, existen dos tipos posibles de combinaciones, (Figuras 45a y b), cuyas características principales son :

- Tendencia asintótica al comienzo y fin de la curva
- Un solo punto de inflexión en la gráfica de toda la curva.

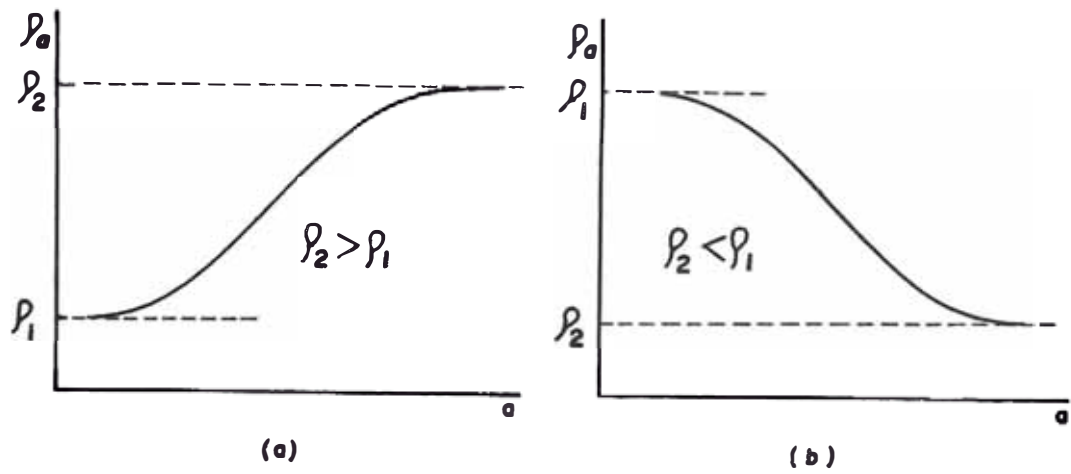


Figura 45.- Suelo estratificado de dos capas

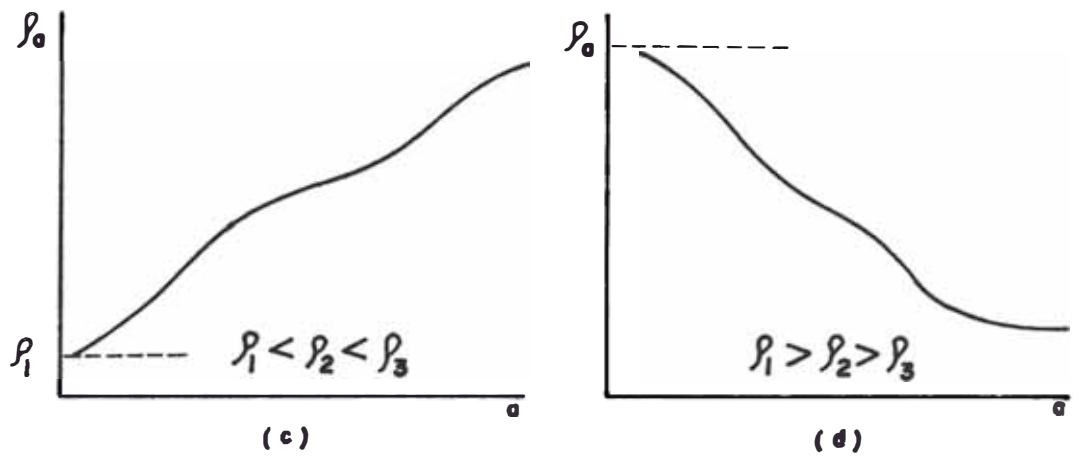
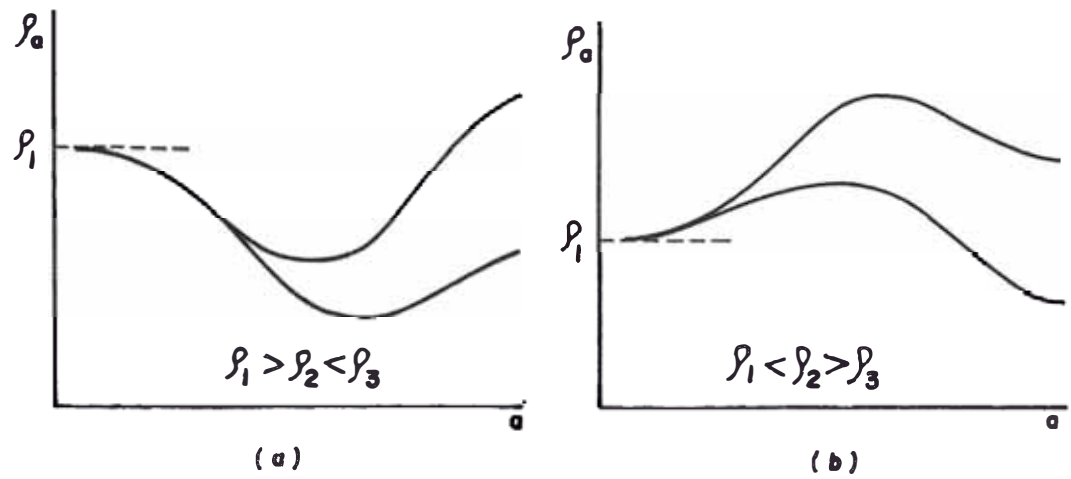


Figura 46.- Suelo estratificado de tres capas

3.1.2.3 Suelo Estratificado de Tres Capas

En un modelo de tres capas, existen cuatro tipos posibles de combinaciones (Figuras 46 a-d), donde se puede observar que las curvas correspondientes a este modelo poseen dos puntos de inflexión.

En general, una curva de n capas puede tener $2^{(n-1)}$ tipos de combinaciones y $(n-1)$ puntos de inflexión.

3.1.3 Interpretación de las Mediciones de Campo

Las mediciones de resistividad aparente pueden ser interpretadas por varios métodos, los cuales en su mayoría son de carácter empírico y se basan en la experiencia acumulada a lo largo de años de mediciones. A continuación se numerarán algunos de ellos y se hará una breve descripción de los más importantes.

- Método de los Quiebres
- Método Acumulativo de Moore
- Método de Barnes
- Método de Interpretación Analítica mediante un Programa Numérico.
- Método de Interpretación mediante Curvas Patrón.

3.1.3.1 Interpretación Analítica Mediante Programas Numéricos

A fin de determinar los parámetros de un modelo de suelo de dos capas a partir de las curvas de resistividad aparente, han sido desarrollados ciertos programas de computadora basados en las interpretaciones analíticas hechas por Gross-Thapar y Tagg, las cuales les serán descritas en forma breve a continuación.

A) Modelo de GROSS - THAPAR

Supone una variación exponencial de la resistividad en función de la profundidad, estando dada la resistividad aparente por la siguiente ecuación :

$$\rho_a = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1) e^{-Ba} \cdot (2 - e^{-Ba}) \quad (84)$$

Esta ecuación puede ser resuelta usando técnicas iterativas y son usados datos experimentales como una primera aproximación.

B) Método de TAGG

Considera un modelo de suelo formado por dos capas horizontales de resistividades uniformes ρ_1 y ρ_2 , cuya resistividad aparente es dada por :

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{k^n}{1 - \left(\frac{2nh}{a}\right)^2} - \frac{k^n}{4 - \left(\frac{2nh}{a}\right)^2} \right\} \quad (85)$$

Utilizando la ecuación anterior y la curva de resistividad aparente obtenida con los datos de campo, se puede determinar los parámetros de un modelo de dos capas (ρ_1 , ρ_2 , h_1), como es mostrado en el programa de computadora RESIS, desarrollado inicialmente por R. Velásquez (35) y posteriormente mejorado como parte del presente trabajo. Las características del programa y resultados para un caso particular son mostrados en el Anexo II.

Los símbolos utilizados en las dos ecuaciones anteriores representan :

- ρ_a : Resistividad aparente, determinada por el método de Wenner (ohmios - metro)
- ρ_1 : Resistividad de la primera capa (ohmios - metro)
- ρ_2 : Resistividad de la segunda capa (ohmios - metro)
- h : Profundidad de la primera capa (metros)
- a : Espaciamiento entre electrodos usado en el método

de Wenner (metros).

$$k \quad : \quad \text{Factor de Reflexión} \quad k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

B \quad : \quad \text{Factor que toma en cuenta la variación vertical de la resistividad del terreno}

3.1.3.2 Interpretación Mediante Curvas Patrón

Este método se basa en la comparación de los gráficos obtenidos en las mediciones de campo con curvas de patrón, construidas expresamente para diferentes casos de combinaciones de capas. En la práctica, existen curvas patrón para las configuraciones de Wenner y Schlumberger, siendo más utilizadas las primeras, cuya familia de curvas ha sido obtenida a partir de la ecuación de Tagg (ecuación 85). Las curvas patrón, así como las obtenidas experimentalmente se grafican en papel log - log, para obtener independencia de las unidades y magnitudes de medición.

Cada modelo de estratos (2 capas, 3 capas, etc.) tiene sus propias curvas patrón, a partir de las cuales es posible obtener las resistividades y espesores de cada estrato, considerando que en un modelo de n capas, la capa n tiene espesor infinito. Cabe mencionar además, que es posible interpretar un modelo de tres capas mediante curvas patrón de dos capas y gráficos auxiliares.

En el Anexo III se muestra el procedimiento para la interpretación de un modelo de dos y tres capas, utilizando curvas patrón de dos capas y los gráficos auxiliares respectivos.

3.1.4 Resultados Experimentales

3.1.4.1 Procedimientos de Medición

El método a utilizar en las mediciones de resistividad es el de cuatro electrodos para la configuración de Wenner, siguiendo las di-

recciones indicadas en la Figura 47. Las separaciones entre electrodos serán escogidas de manera tal que puedan obtenerse distanciamientos casi uniformes en la escala logarítmica utilizada para este parámetro, hasta lograr separaciones mayores a la profundidad de interés; recomendándose un juego de seis mediciones (a, ρ_a) para la obtención de una buena curva y un mínimo de cuatro mediciones para el funcionamiento del programa RESIS. Al enterrar los electrodos se tendrá cuidado en lograr el mejor contacto posible entre estos dispositivos y el terreno, tratando siempre de que la profundidad de enterramiento sea menor que un décimo de la separación entre electrodos ($b < 0.1a$), por lo que se evitarán separaciones menores a un metro.

Lo expresado anteriormente queda sujeto a ciertas restricciones que puedan presentarse en el terreno, quedando a criterio del encargado de las pruebas, tomar las decisiones convenientes para el logro de una buena medición. En la mayoría de los casos las mediciones tan sólo se hacen en dos direcciones perpendiculares (AA' y BB') y a espaciamientos menores de 15 metros.

3.1.4.2 Medición Típica para Un Modelo de Dos Capas

En la Figura 48, se muestran los resultados de las mediciones de resistividad llevadas a cabo en un terreno adyacente a la Subestación San Juan, para cuatro direcciones diferentes como en la Figura 47. La forma de las curvas obtenidas nos sugieren un modelo estratificado de dos capas, las cuales van a ser interpretadas utilizando las curvas patrón para dos capas y el programa numérico RESIS. Por otro lado, debido a que las cuatro curvas obtenidas en la medición son similares y que para la inferencia de los resultados es necesario tan solo una curva, se tomará en cuenta tan solo la curva promedio; aunque hay quienes consideran la curva con valores más pesimistas. La Tabla VII muestra los valores considerados para la curva promedio.

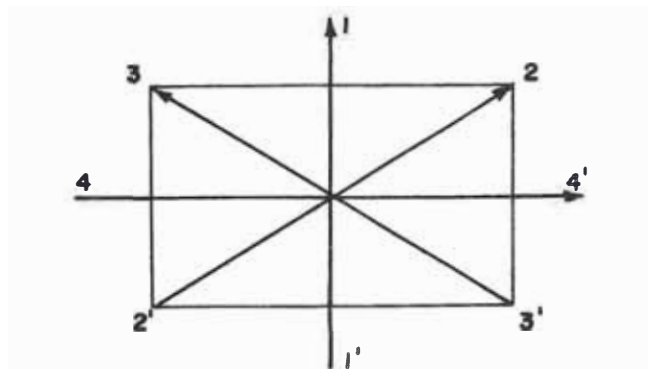
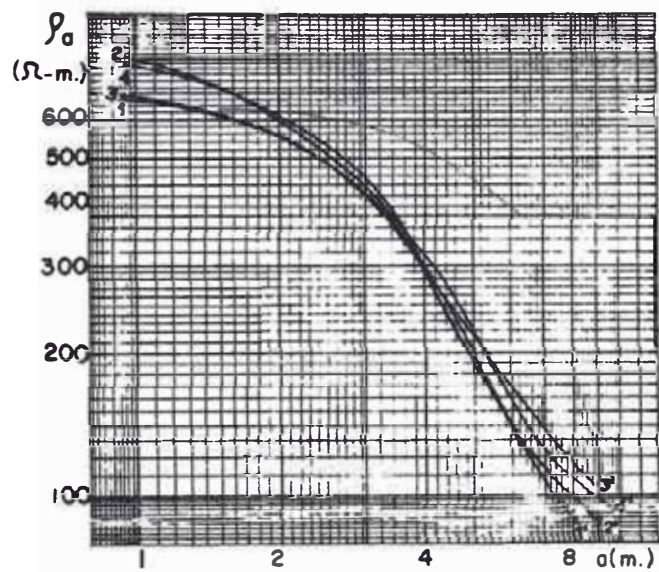
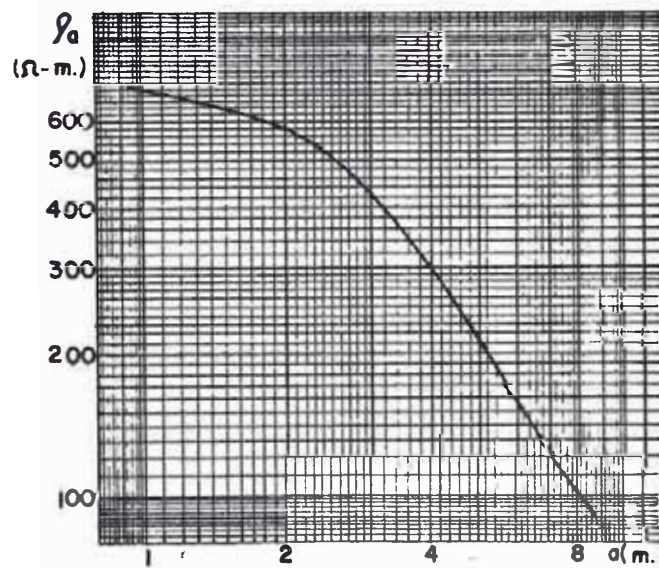


Figura 47.- Direcciones recomendadas para las mediciones de la resistividad del suelo



(a) Curvas de resistividad para cuatro direcciones según la figura 47



(b) Curva de resistividad promedio

Figura 48.- Mediciones de resistividad en la S.E. San Juan-Electroperú

TABLA VII

Separación Entre Electrodo (a) (metros)	Resistividad Promedio (ρ_a) (ohmios - metro)
1	700.6
2	583.40
4	300.30
8	102.70

Los resultados inferidos mediante las dos interpretaciones utilizadas, se encuentran tabulados en la Tabla VIII.

TABLA VIII

Parámetro	Curvas Patrón	Programa RESIS
Resistividad de la Primera Capa (ρ_1)	720 ($\Omega - m$)	793.07 ($\Omega - m$)
Resistividad de la Segunda Capa (ρ_2)	72 ($\Omega - m$)	70.48 ($\Omega - m$)
Profundidad de la Primera Capa (h_1)	2.25 (metros)	2.28 (metros)

3.1.4.3 Resultados Típicos en el Sistema Interconectado

Los resultados obtenidos a lo largo de las mediciones indican la presencia de suelos estratificados ya sea de dos o tres capas, no habiéndose encontrado terrenos con resistividad homogénea. Respecto a las magnitudes de resistividad obtenidas, se puede afirmar que abarcan un amplio rango de valores, mostrándose en la Tabla IX los valores más representativos de los diferentes tipos de suelo donde se encuentran ubicadas

las diferentes edificaciones del Sistema Interconectado.

TABLA IX

Lugar de Medición	Tipo de Terreno	Capa	Profund. (metros)	Resistiv. ($\Omega - m$)
S.E. SAN JUAN	Arenoso	1ra.	2.25	720
		2da.	∞	72
		3ra.	-	-
S.E. CAMPO ARMIÑO	Tierra Pedregosa.	1ra.	1.25	9800
		2da.	∞	1633
		3ra.	-	-
S.E. HUAYUCA CHI.	Cultivo	1ra.	0.88	33
		2da.	∞	5.50
		3ra.	-	-
S.E. JAUJA	Cultivo Pedregoso.	1ra.	0.45	2070
		2da.	3.12	518
		3ra.	∞	37
S.E. CABLE DE GUARDA ÑAHUINPU QUIO.	Cultivo	1ra.	0.75	720
		2da.	7.00	80
		3ra.	∞	475
TORRE N° 10 LINEA MANTARO LIMA.	Arenisco Cuarzoso	1ra.	0.34	6100
		2da.	8.40	48800
		3ra.	∞	5830

...../.

...../.

TORRE N° 109	Cultivo	1ra.	0.60	128
LINEA MANTARO		2da.	∞	51.20
LIMA		3ra.	-	-
TORRE N° 168 - L	Arcilloso	1ra.	2.80	46.50
LINEA MANTARO		2da.	∞	23.30
LIMA		3ra.	-	-

3.2 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Por lo general, cuando se habla de Resistencia de Puesta a Tierra nos referimos al valor óhmico de la impedancia del sistema considerado, realidad que debe tomarse en cuenta con mayor énfasis cuando el valor óhmico de la puesta a tierra es menor de 0.5 ohmios, donde la componente reactiva es apreciable. Esta componente reactiva tiene un efecto pequeño en puestas a tierra con una impedancia mayor de un ohmio (36).

3.2.1 Métodos Básicos de Medición

3.2.1.1 Método de los Dos Terminales

Llamado también método Directo, consiste en la medición de la resistencia de puesta a tierra del electrodo en prueba, a partir de un electrodo auxiliar cuya resistencia de puesta a tierra es presumida insignificante en comparación con la del electrodo a medir. Por lo general, el electrodo auxiliar utilizado es el sistema de tuberías metálicas de agua, supuesto con una resistencia de puesta a tierra de un ohmio, valor realmente bajo en comparación a los 25 ohmios usualmente permitidos para electrodos simples medidos con este método.

Obviamente, este método tiene ciertas limitaciones, aparte de estar sujeto a grandes errores cuando el electrodo bajo prueba tiene un valor de resistencia de puesta a tierra pequeño. La (Figura 49) , muestra las conexiones a realizarse en los instrumentos normalmente con o cu ando se aplica este método.

3.2.1.2 Método de los Tres Terminales

Este método requiere el uso de dos electrodos auxiliares con resistencias de puesta a tierra " r_2 " y " r_3 ", aparte del electrodo ba jo p r ue b a considerado con una resistencia " r_1 ". La resistencia entre cada par de electrodos puestas a tierra es medida y designada como " r_{12} ", " r_{13} " y " r_{23} ", donde $r_{12} = r_1 + r_2$, etc. Resolviendo las ecuaciones simultáneas se obtiene :

$$r_1 = \frac{(r_{12}) - (r_{23}) + (r_{13})}{2} \quad (86)$$

La aplicación de este método también presenta ciertos in con venientes, por lo que se prefiere utilizar otro método de medición que será descrito a continuación.

3.2.1.3 Método de la Caída de Potencial

Este método tiene diversas variaciones y es aplicable a to do tipo de mediciones de resistencia de puesta a tierra, teniendo por con figuración la mostrada en la Figura 50a. El principio de medición consis te en hacer circular una corriente I a través del sistema de puesta a tie rra T y otro electrodo llamado electrodo de corriente C_2 , lo cual pro du ce a una distancia p_2 de T una caída de potencial V_p en el suelo, que es medida por un electrodo de potencial P_2 . El cociente V_p/I es una resistencia aparente que bajo ciertas condiciones puede dar la verdadera resistencia de puesta a tierra R_T del sistema; siendo característico grafi

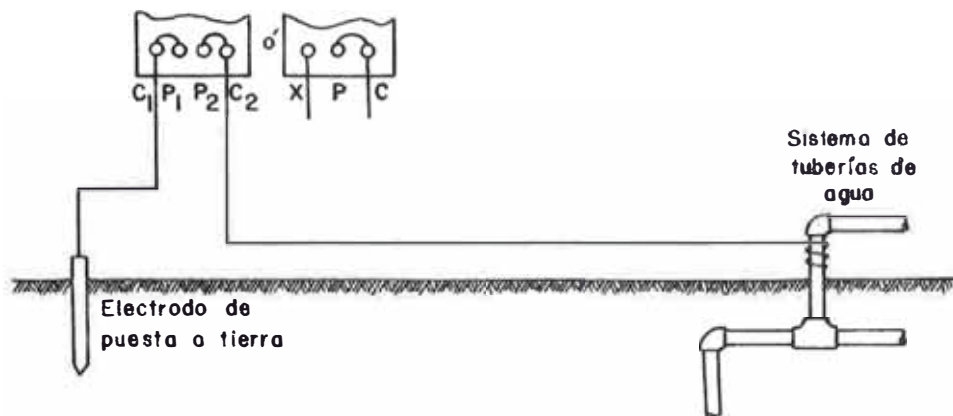
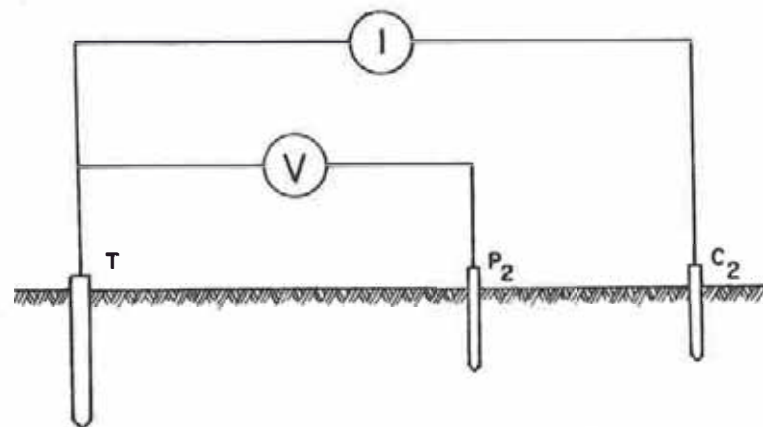
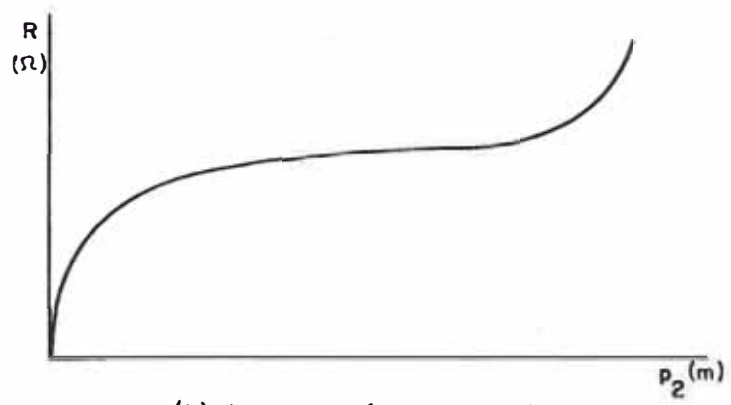


Figura 49 .- Medición de resistencia de puesta a tierra empleando el Método de los Tres Terminales



(a) Configuración típica



(b) Curva de caída de potencial

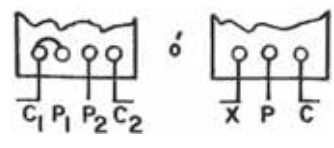


Figura 50 - Método de la caída de potencial

car este cociente como una función de la distancia P_2 del electrodo de potencial, para obtener la curva de caída de potencial mostrada en la Figura 50b.

Para este método, el circuito formado por el electrodo de potencial, el instrumento medidor de potencial y el conductor que los une físicamente a la puesta a tierra T es llamado circuito de potencial; de igual manera el circuito que comprende el electrodo de corriente C_2 , el instrumento medidor de corriente y el conductor que los une físicamente a T es llamado circuito de corriente.

3.2.2 Aplicación del Método de la Caída de Potencial

Para el logro de una buena medición con el empleo de este método, deben tenerse en cuenta ciertas consideraciones que nos permitirán afrontar con confianza los problemas encontrados al momento de la medición.

3.2.2.1 Localización del Electrodo de Corriente

El electrodo de corriente debe estar ubicado fuera del área de influencia de la puesta a tierra medida, en lo que se conoce como tierra remota, que en la práctica implica grandes distanciamientos de los electrodos de corriente, hasta lograr localizaciones donde la densidad de corriente en el terreno tienda a cero.

Inicialmente se recomienda colocar el electrodo de corriente C_2 a una distancia $4D$ de T, donde D es el diámetro equivalente de la red de puesta a tierra. Si con este alejamiento, no se obtienen tres valores aproximadamente iguales de resistencia (tramo A-B de la Figura 51), se deberá incrementar aún más la distancia del electrodo C_2 , hasta lograr el objetivo mencionado anteriormente. La Figura 51 muestra dos curvas con diferentes alejamientos del electrodo C_2 , siendo uno de ellos in

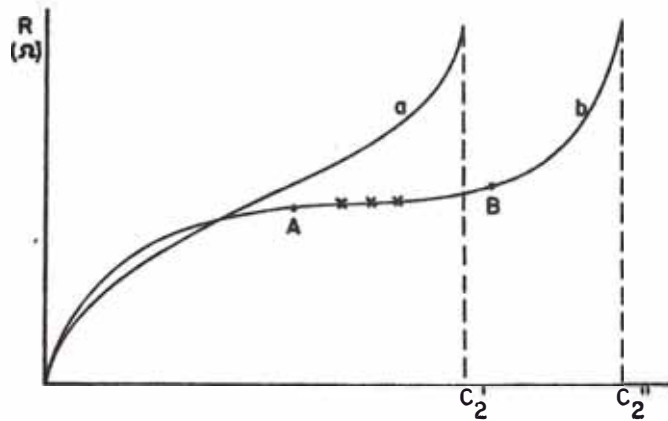
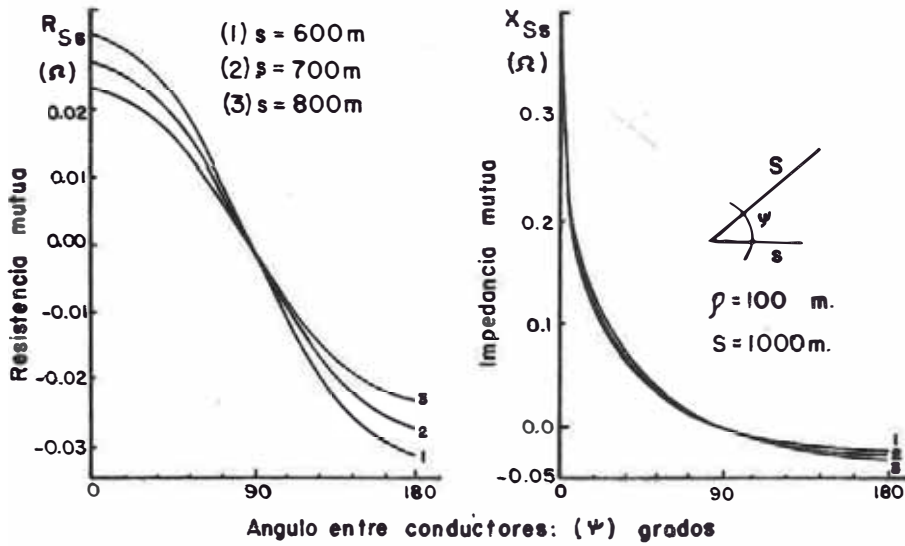
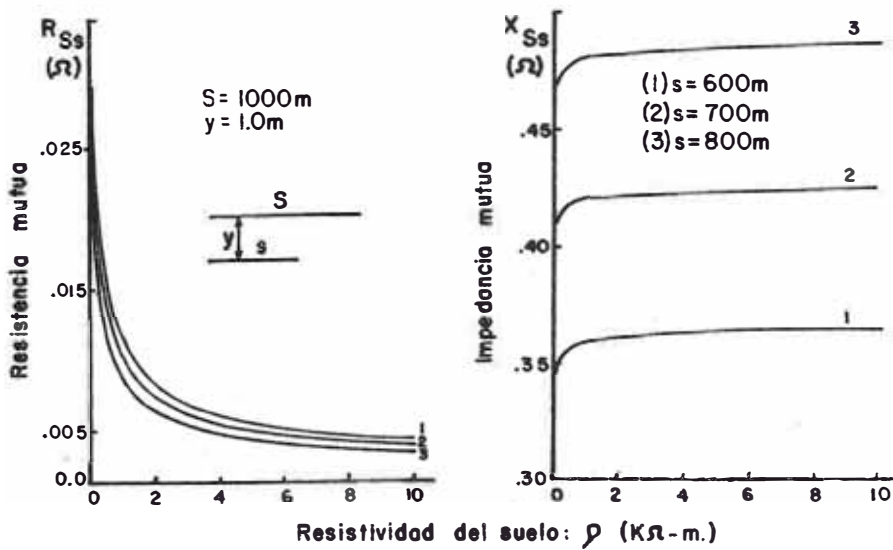


Figura 51.- Efecto del alejamiento del electrodo de corriente



(a) Efecto del ángulo (ψ) entre los conductores de corriente y potencial en la impedancia mutua



(b) Impedancia mutua para conductores paralelos tendidos en terrenos con diferente resistividad

suficiente (a), mientras el otro es el adecuado para la medición (b).

En sistemas de puesta a tierra de grandes dimensiones, el alejamiento adecuado resulta ser mayor a un kilómetro, lo cual resulta impráctico y dificulta la realización de la medición; por lo que G.F. Tagg (37) ha desarrollado un método que no requiere de tan grandes distanciamientos del electrodo C_2 , como se puede observar en el Anexo IV que muestra el procedimiento seguido en este método.

3.2.2.2 Desplazamiento del Electrodo de Potencial

El electrodo de potencial debe ser desplazado para varios alejamientos entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente, de tal manera que se obtenga una curva donde sea fácilmente visualizado el tramo donde su pendiente tienda a cero, que corresponderá a la verdadera resistencia de puesta a tierra del sistema medido. Según resultados empíricos obtenidos por diversos investigadores y también por análisis de programas digitales se ha llegado a determinar que este tramo se presenta al 61.8 % del alejamiento del electrodo de corriente.

3.2.2.3 Acoplamiento Mútuo entre los Circuitos de Potencial y Corriente

El efecto de acoplamiento entre los conductores de corriente y potencial debe ser tomado muy en cuenta cuando se realizan mediciones de impedancia de puesta a tierra en Subestaciones de grandes dimensiones, con valores de un ohmio o menos. Un estudio importante sobre este tema, utilizando un programa de computadora, ha sido desarrollado por R. Velásquez, P.H. Reynolds y D. Mukhedkar (38), en el cual muestran que la única configuración que minimiza el efecto de acoplamiento es manteniendo los conductores de medición en un ángulo de 90° , como se muestra en la Figura 52. La otra alternativa (180° entre los conductores) sugerida por ciertos investigadores, también introduce ciertos e-

rroses debido al acoplamiento mutuo negativo, aparte de que F. Dawalibi en uno de sus artículos ha demostrado teóricamente la imposibilidad de la utilización de esta configuración.

Otras conclusiones importantes obtenidas de los resultados del artículo (38) son :

- Los errores introducidos por el acoplamiento, dependen de la longitud de los conductores, ángulo entre los conductores, resistividad del terreno y el valor de la impedancia de las conexiones de puesta a tierra.
- El acoplamiento tiende a producir un resultado con un valor más elevado que la verdadera resistencia de puesta a tierra (a menos que el ángulo entre los conductores sea mayor de 90 grados, donde el valor resultante es menor).
- El acoplamiento entre conductores paralelos no puede ser reducido significativamente incrementando la separación entre los conductores.

3.2.2.4 Comportamiento de los Electrodo Auxiliares

A fin de realizar una medición de impedancia de puesta a tierra lo más exacta posible, es necesario conocer correctamente el comportamiento de los electrodos auxiliares, ya que una disminución de la resistencia de puesta a tierra tanto en el electrodo de corriente como en el de potencial, va a mejorar la sensibilidad y estabilidad de los instrumentos de medición. Por lo general, es deseable una resistencia menor de 500 ohmios en ambos electrodos, lo cual puede ser logrado interconectando dos, tres o cuatro electrodos en paralelo a un metro de separación y enterrados en lugares de baja resistividad.

Una disminución de la resistencia de puesta a tierra de

los electrodos de corriente va a incrementar el flujo de corriente en el circuito correspondiente produciendo a la vez una mayor elevación del potencial de la puesta a tierra y por lo tanto un incremento de corriente en el circuito de potencial; esto a la vez, hace que el torque en las bobinas de corriente y potencial de los instrumentos aumenten su magnitud, mejorando de esta manera su sensibilidad o precisión. Por otro lado con el incremento de corriente en la bobina de potencial va a elevarse la relación señal a ruido, incrementando de esta manera la estabilidad de los instrumentos.

En forma semejante, si la resistencia de puesta a tierra del electrodo de potencial es reducida, va a circular una mayor corriente por el circuito de potencial, incrementando el torque en la bobina de potencial y elevando el valor de la lectura leída en el instrumento.

3.2.2.5 Corrientes Extrañas en los Circuitos de Medición

La presencia de estas corrientes en los circuitos de medición va a interferir en la realización eficiente de las mediciones, sobre todo cuando la corriente inyectada es de baja magnitud y no se cuenta con los instrumentos apropiados que puedan discriminar dichas corrientes. Para evitar estos inconvenientes, se acostumbra utilizar instrumentos selectores de frecuencias, con un ancho de banda lo más angosto posible, de manera que puedan detectar la señal inyectada en presencia de cualquier corriente extraña.

Estas corrientes pueden ser originadas por la presencia de voltajes residuales cuando los conductores de medición cruzan debajo de líneas energizadas, o debido a las corrientes inducidas de origen solar que son corrientes espúreas, casi directas, causadas por la diferencia de potencial debido a tormentas geomagnéticas resultantes de la emisión de partículas de las protuberancias solares emergentes de la superficie del sol.

3.2.3 Modalidades del Método de Caída de Potencial

La medición de la impedancia de puesta a tierra en sistemas pequeños o en electrodos simples no presenta mayores dificultades y puede realizarse utilizando los instrumentos de medición disponibles en el mercado. Sin embargo, cuando la impedancia incluye una componente reactiva significativa, las mediciones no pueden realizarse con estos instrumentos y es necesario considerar otras modalidades del método de caída de potencial desarrolladas especialmente para estos casos. Estas variaciones se las puede clasificar en dos grupos, dependiendo de la magnitud de la corriente inyectada (39).

3.2.3.1 Inyección de Corriente Elevada

Este método es utilizado principalmente para las mediciones de la impedancia de puesta a tierra de sistemas de grandes dimensiones, inyectando para esto corrientes con una magnitud que puede oscilar entre 50 y 100 amperios, con lo cual se trata de superar los errores debidos a voltajes residuales. Para la inyección de corriente se utilizan los conductores de una de las líneas de transmisión que salen de la Subestación, preferiblemente conectando las tres fases en paralelo para disminuir la impedancia del circuito de corriente. Como electrodo de corriente C_2 , es posible considerar una subestación cercana o una torre de la línea con resistencia de puesta a tierra baja. La caída de potencial se mide utilizando un conductor de comunicaciones, un conductor de baja tensión o un conductor tendido ex-profeso para la prueba.

Si se desea determinar el argumento (ψ) de la impedancia puede ser usado un medidor de desfase de lectura directa, en coordinación con el voltímetro y amperímetro utilizados para medir la caída de potencial V_m y la corriente I_m . La impedancia de puesta a tierra de la subestación será entonces :

$$Z_g = \frac{V_m}{I_m} \angle \psi \quad (\text{ohmios}) \quad (87)$$

Este método tiene algunas variaciones, dependiendo principalmente de la frecuencia de la corriente inyectada, siendo las más conocidas las siguientes :

- Método de la polaridad invertida, inyectando corriente a la frecuencia industrial.
- Método de la frecuencia pulsante, inyectando corriente a una frecuencia entre 0.1 á 0.5 Hz. encima o debajo de la frecuencia industrial.
- Método de la compensación de la interferencia.
- Método de inyección de corriente a una frecuencia claramente diferente a la frecuencia industrial (entre 5 a 10 Hz encima o debajo de la frecuencia industrial).

3.2.3.2 Inyección de Corriente de Baja Magnitud

En la mayoría de los casos resulta difícil realizar una medición de impedancia de puesta a tierra inyectando corriente elevada, debido principalmente a que esto implica tener una línea o toda la subestación fuera de servicio, aparte de las precauciones de seguridad que deben tomarse para la protección del personal e instrumentos. Por otro lado, los instrumentos normalmente usados, tampoco son una solución cuando se trata de medir impedancias pequeñas y en presencia de voltajes residuales; por lo que han sido desarrolladas ciertas técnicas de medición que utilizan corrientes de prueba de baja magnitud y a frecuencias diferentes de la industrial. Entre las técnicas propuestas destacan :

- A) Método del Oscilador - Voltímetro (Laidig y Zupa)

Este método recomienda el uso de una señal de corriente de baja magnitud (0.5 amperios), a una frecuencia cercana a la industrial (65 - 70 Hz) y considera como impedancia a 60 Hz la medida a la frecuencia de prueba. El valor medido representa la impedancia Thevenin equivalente de todos los caminos en serie y en paralelo que existen entre la malla de la Subestación y la tierra remota. La configuración e instrumentación utilizada en este método es mostrada en la Figura 53.

B) Método James G. Biddle

A fin de medir impedancias de puestas a tierra de baja magnitud y en presencia de gran interferencia, la Compañía James G. Biddle ha desarrollado un nuevo instrumento portátil, cuyo funcionamiento se basa en la inyección de corriente de una magnitud conocida a través de la puesta a tierra, midiendo simultáneamente las componentes de la caída de potencial en fase y en cuadratura, para luego mostrar estos voltajes como resistencia e inductancia. Las mediciones son hechas utilizando ondas sinusoidales a cuatro frecuencias conocidas (36, 85, 128, 146 Hz.), obteniéndose la impedancia a 60 Hz por extrapolación.

C) Método de la Frecuencia Exploratoria (I.D. Lu y R.M. Shier)

Para evitar posibles errores que se puedan cometer en la evaluación de la impedancia a 60 Hz. al hacer la extrapolación como lo sugiere el método anterior y cuando la impedancia no varía uniformemente con la frecuencia, se ha desarrollado una técnica de frecuencia exploratoria, la cual permite realizar una representación gráfica completa de la impedancia y su desfasaje sobre un amplio rango de frecuencia. La fuente de señal de ruido es ajustada de 0 a 400 Hz y consiste de un generador con frecuencias casi al azar, un filtro condicionador del ruido y un amplificador de potencia de 1.5 KW.

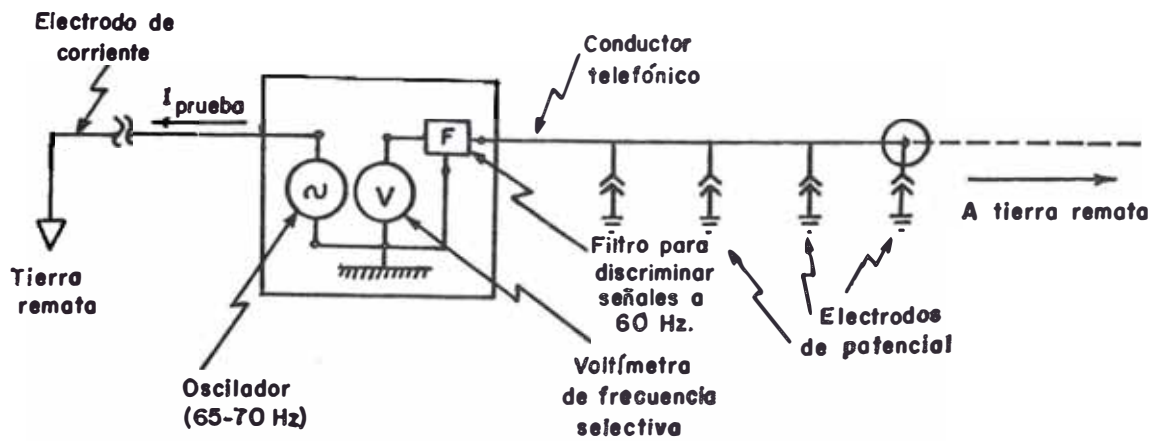


Figura 53.- Método para medir la resistencia de puesta a tierra inyectando corriente de baja magnitud según Laidig y Zupa

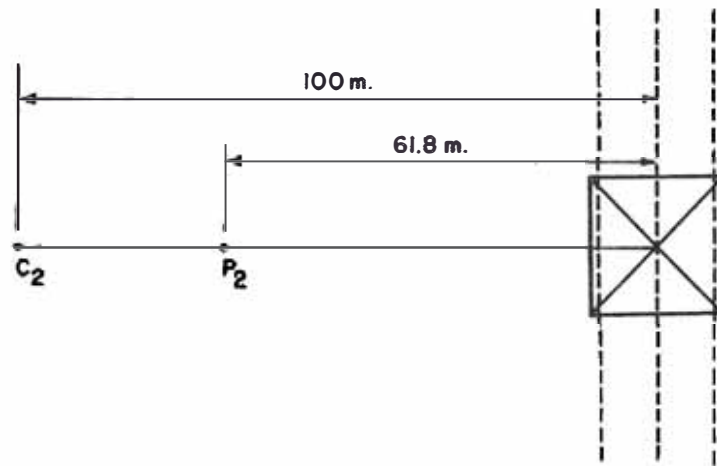


Figura 54.- Configuración de los electrodos de corriente y potencial para medir la resistencia de puesta a tierra de una torre

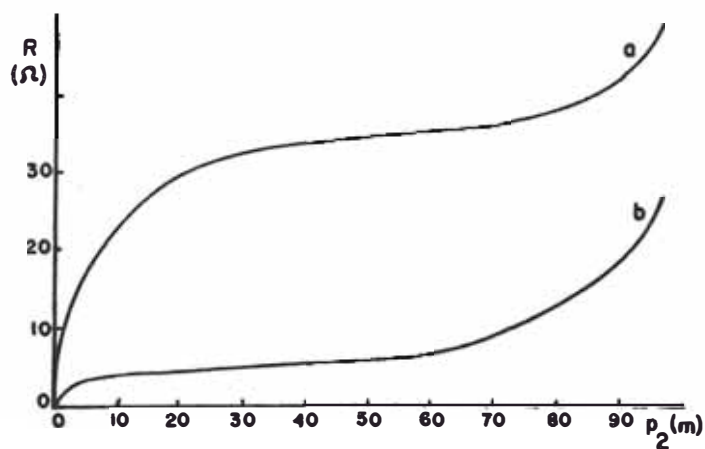


Figura 55.- Curvas obtenidas en la medición de resistencia de puesta a tierra en la torre N° 24- Línea Mantara Lima
 Curva "a".- Con cable de guarda aislado
 Curva "b".- Con cable de guarda conectado

3.2.4 Resultados Experimentales

3.2.4.1 Mediciones en Líneas de Transmisión

La configuración escogida para las mediciones de la impedancia de puesta a tierra en las estructuras de una línea de transmisión es la mostrada en la Figura 54, la cual considera los circuitos de corriente y potencial en paralelo, haciendo un ángulo de 90° con la trayectoria de la línea, evitando así posibles interferencias en los conductores de medición por acción de la corriente a 60 Hz circulando en la línea.

El efecto de acoplamiento que podría existir en los conductores de medición por estar en paralelo, resulta insignificante (menos de 0.05 ohmios para 100 metros) frente a las magnitudes de resistencia de puesta a tierra de las torres con valores superiores a un ohmio. Este efecto debería considerarse en caso de que el electrodo de corriente se encuentre ubicado a distancias superiores a los 100 metros, siendo ésta una de las razones para que en nuestras mediciones se recomiende un alejamiento del electrodo C_2 de 100 metros.

De igual manera resulta importante considerar en estas mediciones la influencia del cable de guarda, por cuanto utilizando los instrumentos normales y estando el cable de guarda conectado a las estructuras van a obtenerse resultados optimistas, debido a la baja resistencia del cable de guarda en paralelo con la resistencia de puesta a tierra de la torre. Por lo tanto, para medir en forma correcta este parámetro es necesario aislar la estructura del cable de guarda de la línea de transmisión.

En la actualidad existe en el mercado un instrumento capaz de medir la resistencia de puesta a tierra de una estructura, eliminando la influencia del cable de guarda. Este instrumento fué diseñado por la Brown Boveri, funciona a una frecuencia alta de 25 KHz, es completamente transistorizado y utiliza pilas de Ni - Cd. La Tabla X muestra al

gunos resultados obtenidos con este instrumento en estructuras ubicadas en tres tipos de terreno con diferente resistividad, resultados que son comparados con los medidos con el telurómetro marca Megger y el Vibroground, comprobándose la efectividad del funcionamiento del aparato.

Los resultados experimentales confirman que la relación entre el valor de resistencia de puesta a tierra de una estructura con el cable de guarda aislado y sin aislar es siempre mayor que la unidad (Figura 55). notándose además que para una línea de transmisión con un mismo tipo y número de cables de guarda, estructuras y puestas a tierra semejantes, el principal factor que va a condicionar esta relación es la resistividad del terreno, como se observa en la Tabla XI; por lo que resulta posible obtener un valor aproximado de la resistencia de puesta a tierra de una estructura aislada a partir de los valores de resistividad del terreno y de la resistencia medida con el cable de guarda conectado.

En lo referente a las magnitudes de resistencia de puesta a tierra medidas en la Línea de Transmisión Mantaro - Lima, estas varían en un amplio margen de valores, pudiendo encontrarse valores tan elevados (mayores a 100 ohmios) como también valores bajos (1 ohmio), estando un 30 % por encima de los 25 ohmios.

Para las Tablas X y XI, la resistividad aparente se obtuvo a partir de :

$$\rho_a = \frac{100 \rho_1 \rho_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}$$

donde :

- C_1 : Porcentaje del sistema de puesta a tierra en la primera capa del terreno
- C_2 : Porcentaje del sistema de puesta a tierra en la segunda capa del terreno

Esta fórmula fué obtenida a partir de la expresión para en contrar la resistividad aparente usando un electrodo vertical y tan solo servirá como un índice de comparación entre los diferentes tipos de terreno.

TABLA X

MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA USANDO UN
MEDIDOR DE ALTA FRECUENCIA BBC TIPO HW 2 W
Contrastación con el Telurómetro Marca Megger y el Vibroground

Torre N°	Instrumento Utilizado	Resistividad Aparente (ohmios-metro)	Cable de Guarda	Resistencia de Puesta a Tierra (Ohmios)
10	BBC	44530	Sin Aislar	92.00
10	BBC	44530	Aislado	95.00
10	Megger	44530	Aislado	91.00
10	Vibroground	44530	Aislado	106.00
25	BBC	1440	Sin Aislar	15.60
25	BBC	1440	Aislado	18.20
25	Megger	1440	Aislado	18.20
25	Vibroground	1440	Aislado	20.60
109	BBC	98.50	Sin Aislar	5.00
109	BBC	98.50	Aislado	5.20
109	Megger	98.50	Aislado	5.10
109	Vibroground	98.50	Aislado	5.20

El alejamiento del electrodo de corriente fué de 100 metros, según la configuración mostrada en la Figura 54.

TABLA XI

MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
EN LA LINEA MANTARO - LIMA

Muestreo en Estructuras Ubicadas en Terrenos con
Diferentes Valores de Resistividad

N° de la Torre	Torre sin Aislar R_s (Ohmios)	Torre Aislada R_a (Ohmios)	Relación R_a / R_s	Resistividad Aparente (Ohms-metro)
10	39.00	320.00	8.20	44530.0
24	8.00	36.50	4.56	2139.0
25	6.00	18.20	3.03	1440.0
136	5.23	15.10	2.88	1221.0
109	2.05	5.10	2.48	98.5

El instrumento utilizado fué el Telurómetro marca Megger, de acuerdo a la configuración de la Figura 54.

3.2.4.2 Mediciones en Subestaciones

Las mediciones de resistencia de puesta a tierra en Subestaciones también fueron realizadas utilizando el Método de Caída de Potencial, con los instrumentos normales de medición (Telurómetro marca Megger, Vibroground, etc.) y también inyectando corriente de diversa magnitud. Para Subestaciones Pequeñas se utilizó el Método Clásico, esto es, colocando el electrodo de corriente a una distancia que evite el traslape de las áreas de influencia de los electrodos que intervienen en la prueba, con una separación de 90° entre los circuitos de potencial y corriente y variando el electrodo de potencial de tal manera que pueda ser graficada la curva de caída de potencial.

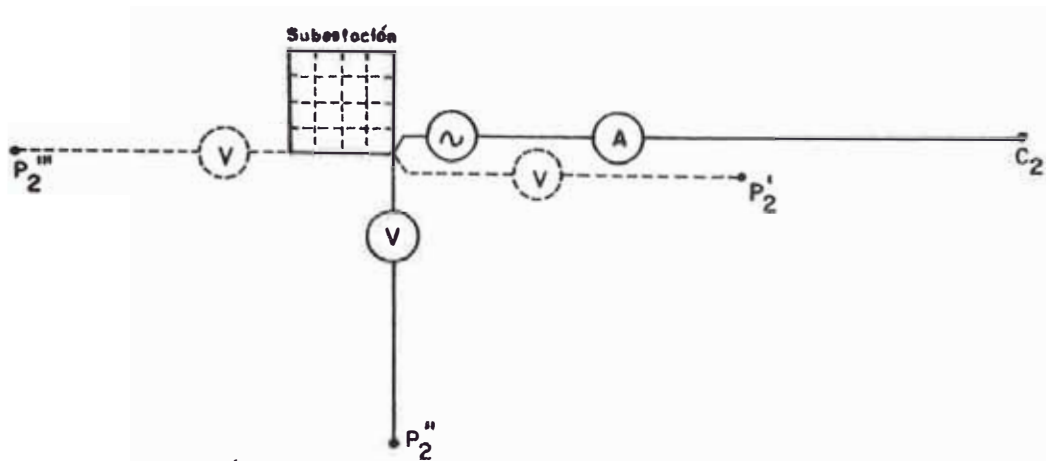
Para Subestaciones de grandes dimensiones como las del Sistema Interconectado, se utilizó el método indicado en el Anexo IV, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla XII.

TABLA XII

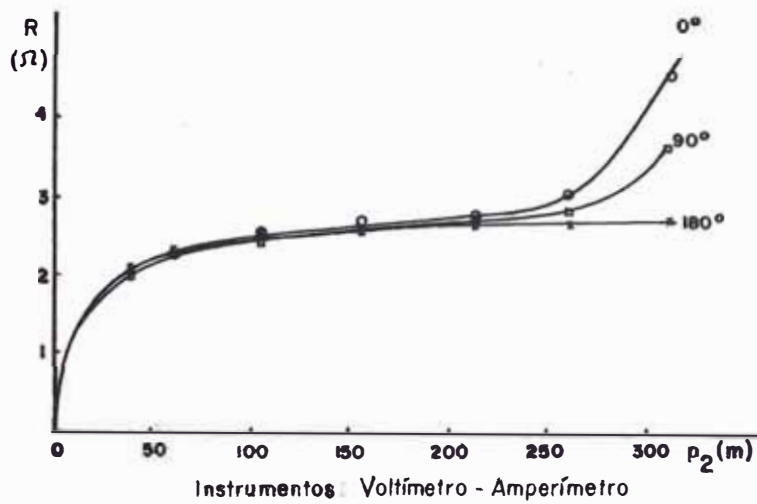
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LAS PRINCIPALES
SUBESTACIONES DEL SISTEMA INTERCONECTADO

Subestación	Valor Medido (Ohmios)
Campo Armíño	0.97
Huayucachi	0.38
Pomacocha	0.55
San Juan	0.13
Independencia	0.25
Ica	0.76
Marcona	0.40

Además, a manera de estudio se realizaron una serie de mediciones en la S.E. Jauja cuando se encontraba en proceso de construcción, cuyos resultados son mostrados en la Tablas XIII y XIV y en la Figura 56. En la Tabla XIII y la Figura 56b se muestra el efecto del ángulo de separación entre los conductores de corriente y potencial; mientras que en la Tabla XIV y la Figura 56c, se muestran los resultados obtenidos cuando se utilizan diferentes tipos de instrumentos, haciendo notar que para el caso de inyección de corriente se tuvo el inconveniente de la presencia de corrientes residuales que produjeron un cierto error en los valores medidos, debido principalmente a la pequeña magnitud de la corriente inyectada y a que no se contaba con los instrumentos capaces de discriminar estas corrientes.

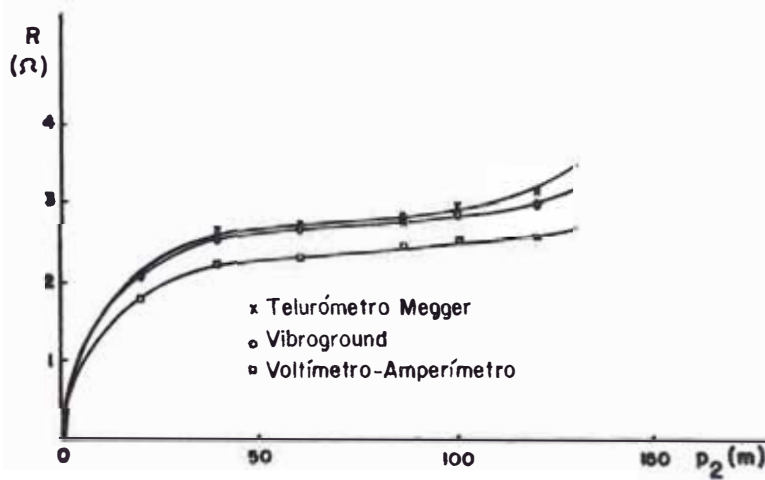


(a) Configuración de los circuitos de corriente y potencial para diferentes ángulos de separación



c_2 : 350 metros

(b) Curvas de caída de potencial para la configuración de (a)



Angulo entre conductores: 90°

c_2 : 140 metros

(c) Curvas obtenidas con diferentes tipos de instrumentos

Figura 56.- Mediciones de resistencia de puesta a tierra en la S.E. Jauja

TABLA XIII

MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA
SUBESTACION JAUJA PARA DIFERENTES ANGULOS DE
SEPARACION ENTRE LOS CIRCUITOS DE MEDICION (*)

Angulo de Separación	Alejamiento de C_2 (metros)	Resistencia Medida (Ohmios)
0°	350	2.75
90°	350	2.72
180°	350	2.70

(*) Se utilizó el Método de Inyección de Corriente, con una magnitud de 1 amperio.

TABLA XIV

MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA UTILIZANDO
DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS

Instrumento Utilizado	Alejamiento C_2 (metros)	Angulo de Separación	Resistencia Medida (Ohmios)	Resistencia Calculada (Ohmios)
Megger	140	90°	2.75	3.30
Vibroground	140	90°	2.80	3.30
Volt - Amp	140	90°	2.30	3.30

3.3 PERFIL DE POTENCIAL Y TENSIONES DE TOQUE Y PASO

La mejor manera de tener la certeza que la puesta a tierra de una Subestación o una Torre presta toda la seguridad al Personal que podría encontrarse dentro o en los alrededores del área de diseño, es midiendo los potenciales de toque y paso o el perfil de potencial cuando se inyecta una cierta magnitud de corriente. En la práctica estas mediciones no son muy frecuentes, debido a su costo elevado y son mayormente recomendables en casos en que los valores de potencial calculados son cercanos a los límites tolerables y además el mejoramiento de la puesta a tierra va a resultar difícil o demasiado costoso.

El perfil de potencial es hecho con el fin de localizar posibles gradientes de potencial peligrosos durante la ocurrencia de una falla aunque también es útil para inferir las tensiones de toque y paso en ese mismo momento. Cuando la medición del perfil de potencial no se justifica económicamente, los gradientes de potencial pueden ser calculados de las mediciones de resistencia de puesta a tierra y la resistividad del suelo.

3.3.1 Método de Medición del Perfil de Potencial

El perfil de potencial puede ser obtenido inyectando corriente ya sea de magnitud baja o elevada, utilizando el método del Voltímetro - Amperímetro. La IEEE y diversos investigadores recomiendan que el orden de magnitud de la corriente a inyectar debe ser entre 50 y 100 amperios, a fin de eliminar los efectos de interferencia de corrientes extrañas en el suelo, dejando el uso de corriente de magnitud baja para casos en que la Subestación no pueda ser sacada de servicio, para lo cual será necesario emplear una frecuencia diferente a la industrial, aparte de la implementación de aparatos de mayor sensibilidad y mucho más sofisticados.

La configuración de los circuitos debe ser semejante a la recomendada en el método de Caída de Potencial (Figura 57), colocando el electrodo de corriente C_2 en un lugar remoto y haciendo en lo posible un ángulo de 90° con el circuito de potencial. Las mediciones de potencial son hechas a lo largo de varias secciones dentro y fuera del área de puesta a tierra, por lo general en direcciones con frecuente circulación de Personal. El electrodo de potencial puede ser el mismo que se utiliza para medir la resistencia de puesta a tierra, siendo imprescindible un voltímetro de muy alta impedancia de entrada. Los potenciales bajo las condiciones de falla reales, se obtienen multiplicando los valores medidos en la prueba por la relación entre la corriente de falla a tierra más severa y la corriente de prueba. El perfil de potencial se logra graficando estos potenciales en función de la longitud a lo largo de la sección tomada como referencia.

3.3.2 Método de Medición de las Tensiones de Toque y Paso

Para medir las tensiones de toque y paso se utiliza el mismo circuito de corriente empleado para la medición del perfil de potencial, a través del cual se inyectará cierta magnitud de corriente que producirá diferenciales de potencial dentro y fuera del área de la puesta a tierra. Las mediciones deben ser hechas en lugares con frecuente circulación de personal como son pasadizos, puertas, zonas aledañas a los equipos, etc. Los electrodos de potencial deben ser de tal manera que asemejen un contacto superficial parecido al originado por los pies de una persona al caminar (Figura 58a), esto es con una elevada resistencia de contacto. La configuración de los circuitos se muestra en la Figura 58b, donde el voltímetro utilizado debe ser necesariamente de alta impedancia de entrada. Los potenciales bajo condiciones de falla reales se obtienen de la misma manera que en el caso del perfil de potencial.

Heinrich Langer y M.G. Bodier (23), han descrito un método para medir las tensiones de toque y paso en una Subestación, en el que

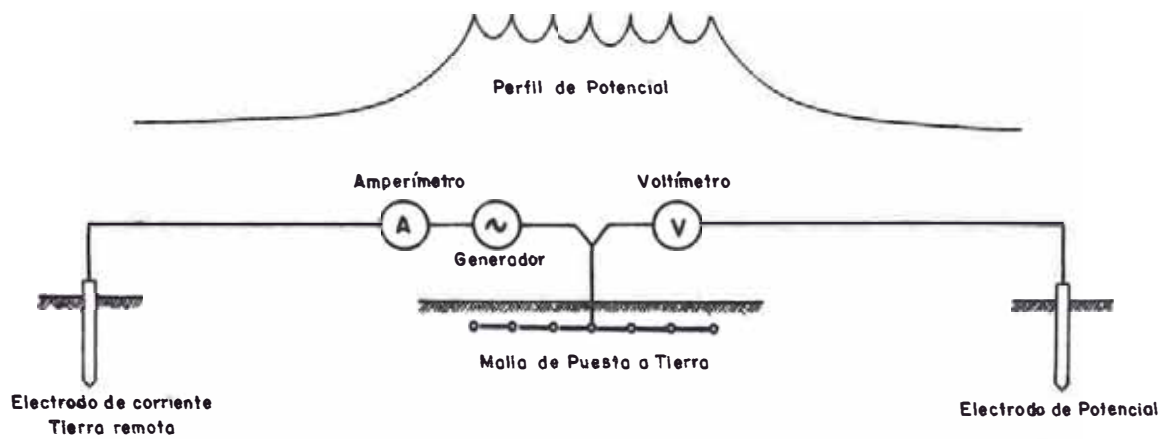
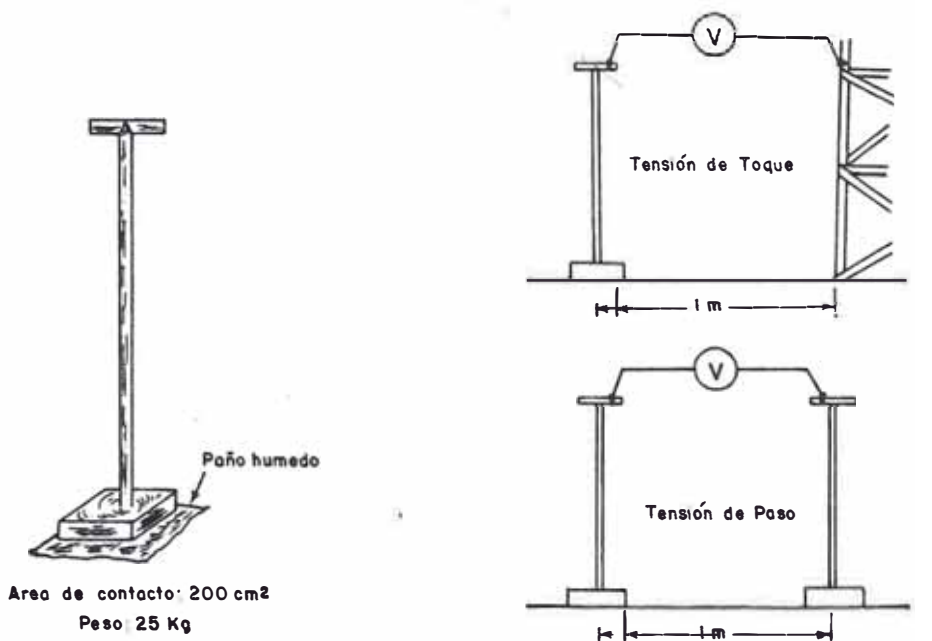
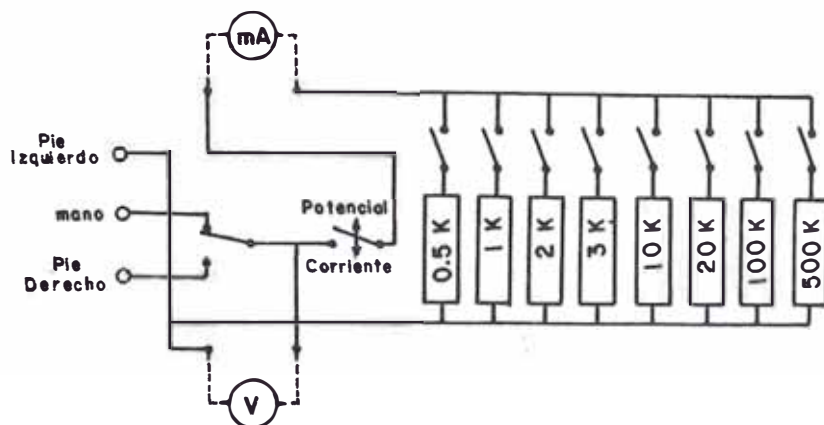


Figura 57.- Configuración para la medición del Perfil de Potencial



(a) Patin de acero para la medición de Tensiones de Toque y Paso

(b) Configuraciones para la medición de Tensiones de Toque y Paso



(c) Circuito de Prueba recomendado por H. Langer para la medición de las Tensiones de Toque y Paso

Figura 58

tratan de simular lo más cercanamente posible las resistencias de contacto superficial de los pies y la resistencia del cuerpo humano; para lo cual la persona encargada de la medición debe llevar puestos guantes y botas de material aislante con superficies de contacto metálicos. Los voltajes entre estos contactos son medidos con un voltímetro de tubos de vacío o válvulas; mientras que la corriente es medida por un miliamperímetro utilizando el circuito de la Fig. 58 c.

3.3.3 Resultados Experimentales

En el Sistema Interconectado del Centro del Perú se han realizado diversas mediciones del perfil de potencial y de las tensiones de toque y paso, destacando la efectuada en la Subestación Pachachaca antes de su puesta en servicio, cuya malla de puesta a tierra ocupa un área de 190 x 100 metros y se encuentra ubicada sobre un terreno tipo arcilloso. Esta Subestación sirve para la interconexión con el Sistema Eléctrico de Centromiñ a un nivel de 220 kV, no contando con ningún transformador de potencia entre sus equipos. La metodología empleada en las mediciones fué la de inyectar corriente lo más alta posible que se pudo obtener con los instrumentos y equipos con que contaba en ese momento (25 Amperios), a una frecuencia de 60 Hz y de acuerdo a la configuración descrita en 3.3. 1. Los principales instrumentos y equipos utilizados en las pruebas fueron :

- 01 Grupo Electrónico de 130 KVA Salida : 220 Voltios C.A.
- 01 Autotransformador variable de 0 a 230 Voltios. 30 Amperios.
- 01 Voltímetro C.A. de alta impedancia de entrada. Escala : 0 a 600 Voltios. Clase 0.5
- 01 Amperímetro C.A. Escala : 0 a 50 Amperios. Clase 0.5
- 02 Patines de acero para simular el contacto de los pies de una persona con el piso, cada uno con un peso de 25 kg, y una superficie de contacto de 200 cm² , como lo recomiendan las normas VDE 0100 (Figura 58a).

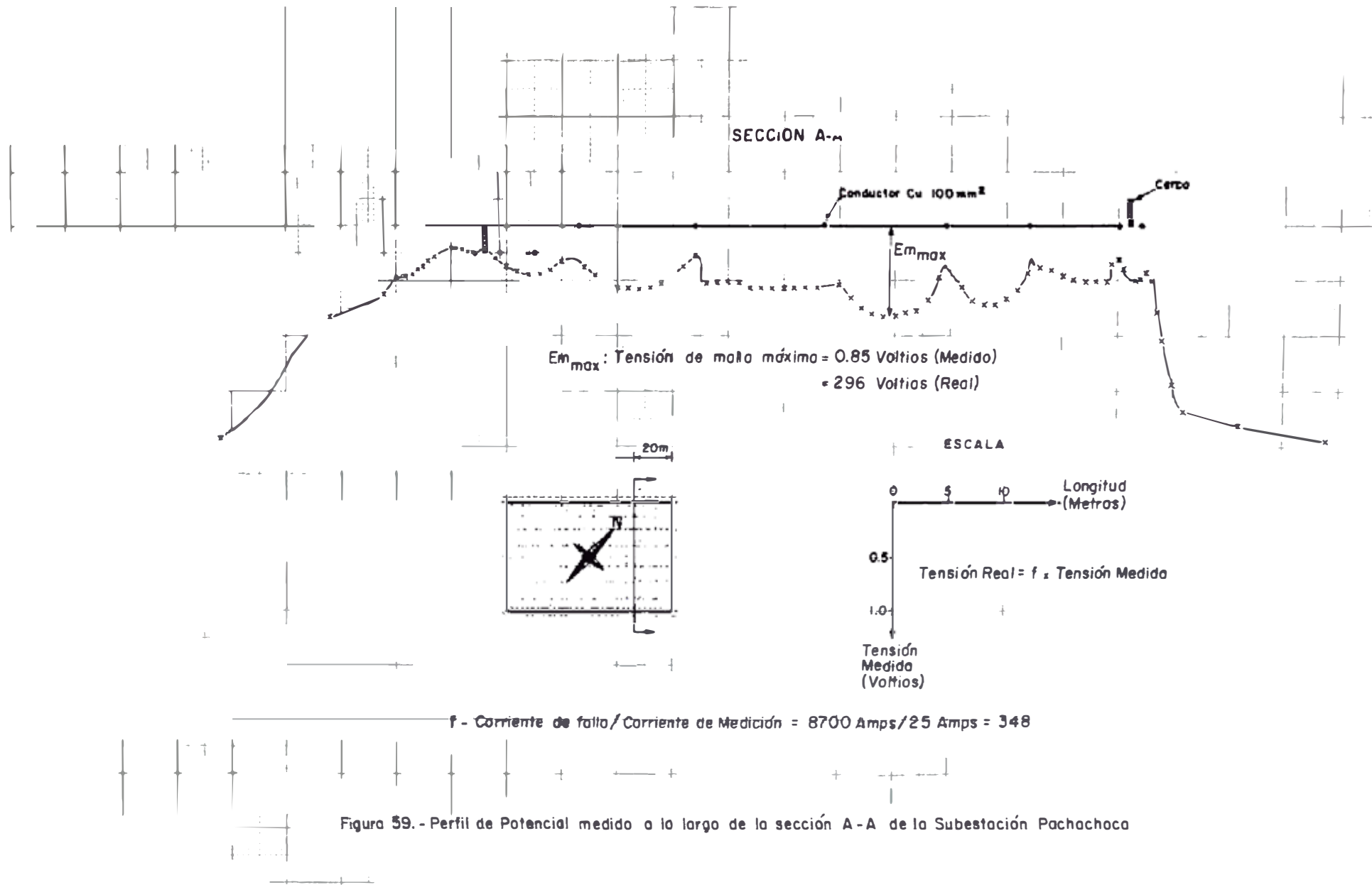


Figura 59.- Perfil de Potencial medido a lo largo de la sección A-A de la Subestación Pachachoca

Para el electrodo de corriente se preparó un pozo de puesta a tierra con un relleno de sal industrial, carbón y tierra vegetal, el cual dió una resistencia de puesta a tierra menor a los 5 ohmios y fué localizado a una distancia de 800 metros del centro de la Subestación en Dirección Sur. Además, con el fin de optimizar el tiempo y evitar accidentes durante las pruebas, se contó con el apoyo de un equipo compuesto por 03 Técnicos y 06 Ayudantes, aparte del responsable de las pruebas; todos los cuales se encontraban intercomunicados por un sistema de Walk - Talkies.

Durante la secuencia de pruebas, en primer lugar se hicieron las mediciones para obtener el perfil de potencial, el cual se muestra en la Figura 59 y posteriormente las mediciones de las tensiones de toque y paso. Cabe hacer notar que las máximas tensiones de toque y paso fueron medidas en las puertas de acceso a la Subestación (102 y 40 voltios), aunque en ninguno de los casos sobrepasan los valores permisibles por las normas. Para lograr una mejor medición en el caso de las tensiones de toque y paso se emplearon pedazos de paño húmedo para lograr un contacto efectivo entre los patines de acero y el suelo.

3.4 CORRIENTES INDUCIDAS EN LAZOS CERRADOS

3.4.1 Corriente Inducida en un Contorno Rectangular

Según la Ley Circuital de Ampere, la intensidad de flujo magnético alrededor de un conductor recto conduciendo una corriente i , como en la Figura 60) es:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \pi r} \quad \text{si } r > a \quad (87)$$

donde:

- B : Intensidad de flujo magnético (Weber/m²)
- i : Corriente circulante en el conductor (amperios)
- r : Distancia al eje del conductor (metros)
- μ_0 : Permeabilidad del aire

Conociendo el valor de la intensidad de flujo magnético alre

dedor de un conductor, es posible calcular la fuerza electromotriz inducida en un contorno cerrado estacionario por algún sistema de corrientes variables con el tiempo, utilizando la ley electromagnética de Faraday.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (88)$$

Para el caso de un contorno rectangular simple de lados L y h , paralelo a un conductor que transporta una corriente $i = I_m \text{ Sen } \omega t$, (Figura 61), el flujo magnético a través del área será :

$$\begin{aligned} \phi &= \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ \phi &= \int_S B \, dS \, \text{Sen } \beta \end{aligned} \quad (89)$$

considerando :

$$dS = L \, dh$$

$$dh \, \text{Cos } \beta = r \, d\beta$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

se obtiene :

$$\phi = \frac{\mu_0 i L}{2\pi} \int_{-\beta_2}^{\beta_1} \text{tg } \beta \, d\beta \quad (90)$$

realizando la integración anterior se puede obtener la expresión para el flujo magnético.

$$\phi = \frac{\mu_0 i L}{2\pi} \ln \frac{\text{Cos } \beta_2}{\text{Cos } \beta_1} \quad (91)$$

Teniendo en cuenta que la corriente circulante en el conductor es $i = I_m \text{ Sen } \omega t$, aplicamos la ecuación (88) para obtener la tensión inducida en el contorno rectangular debido a esta corriente.

$$\mathcal{E} = - \frac{\mu_0 \omega L I_m}{2\pi} \ln \frac{\text{Cos } \beta_2}{\text{Cos } \beta_1} \cdot \text{Cos } \omega t \quad (92)$$

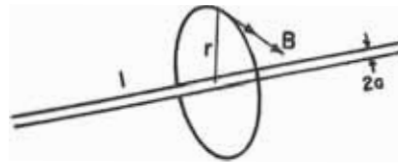
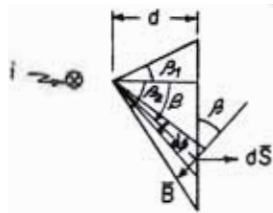
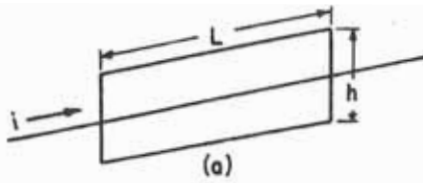
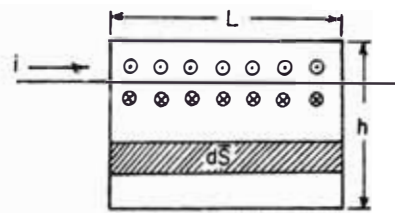


Figura 60.- Campo magnético alrededor de un conductor



(b)



(c)

Figura 61.- Inducción de corriente en un lazo rectangular

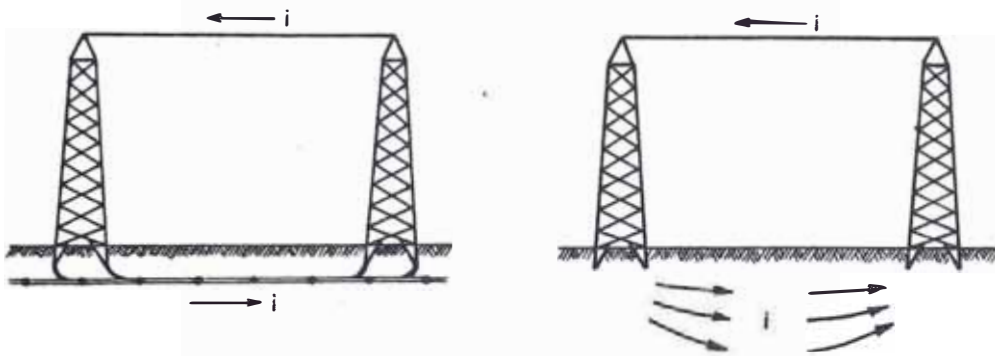


Figura 62 - Lazos cerrados en subestaciones y líneas de transmisión

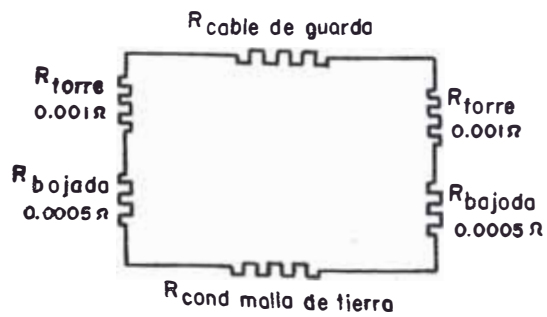


Figura 63 - Circuito aproximado de un lazo cerrado

Si se considera la tensión máxima inducida en el contorno como :

$$E_{m,ind} = - \frac{\mu_0 w L I_m}{2 \pi r} \ln \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \quad (93)$$

la expresión (92) se simplifica a :

$$\mathcal{E} = E_{m,ind} \cos \omega t \quad (94)$$

por consiguiente, la corriente inducida en el lazo rectangular será :

$$i = \frac{E_{m,ind}}{R_L} \cos \omega t = I_{m,ind} \cos \omega t \quad (95)$$

donde :

$$I_{m,ind} = \frac{E_{m,ind}}{R_L}$$

$$R_L = \text{Resistencia del Lazo Rectangular}$$

3.4.2 Lazos Cerrados en Subestaciones y Líneas de Transmisión

En casos reales como los observados en la Subestaciones y Líneas de Transmisión, los lazos cerrados están formados por los cables de guarda, las estructuras de los pórticos o torres, los conductores de la malla de tierra y en algunos casos la tierra misma (Figura 62).

3.4.2.1 Cables de Guarda

Constituye la parte superior del lazo y su resistencia puede ser calculada con las características eléctricas proporcionadas por el fabri_{ca}nte para cada tipo de cable de guarda.

3.4.2.2 Estructuras de los Pórticos y Torres

Constituyen las componentes laterales del lazo, siendo el valor de sus resistencias muy pequeñas frente a las otras resistencias que

forman el lazo. Los cálculos y mediciones realizados para conocer su magnitud nos llevan a considerar los siguientes valores aproximados :

- Resistencia de la estructura de un Pórtico : 0.001 ohmios
- Resistencia de la estructura de una Torre : 0.0015 ohmios

Debido a lo engorroso que resultaría realizar un cálculo teórico exacto de la resistencia de una estructura, en el procedimiento seguido para calcular este parámetro se la consideró como una pirámide con cuatro soportes en paralelo. Las mediciones se efectuaron en las torres de entrenamiento de la Subestación San Juan de ELECTROPERU, S.A. utilizando un puente Thompson, obteniéndose valores menores a un miliohmio.

3.4.2.3 Conductores de la Malla de Tierra

En la parte inferior el lazo es cerrado a través de los conductores de la malla de puesta a tierra, unidas a las estructuras por conductores del mismo material que el de la malla. El efecto resistivo del suelo es considerado despreciable, debido a la gran diferencia de conductividades entre el terreno y el material del cual está hecho el conductor, lo cual nos lleva a considerar que casi toda la corriente inducida va a circular a través de los conductores de la malla.

3.4.2.4 Efecto Conductor del Suelo

En caso de que las estructuras que conforman un lazo no se encuentren unidas físicamente por un conductor enterrado, la circulación de corriente puede realizarse a través del suelo donde se encuentran ubicadas las estructuras.

La Figura 63, muestra el circuito aproximado de un lazo cerrado que se puede formar en una Subestación; indicando además ciertos valores que se podrían considerar constantes en todos los cálculos a efectuarse.

3.4.3 Modelo de Cálculo para un Caso Tipo

A continuación se muestra el procedimiento para el cálculo de la corriente inducida en un caso real simple, el mismo que nos servirá posteriormente para los cálculos que se tengan que hacer en casos más complicados como los que se presentan en las Subestaciones. La disposición de los elementos que forman el lazo cerrado y los conductores que transportan la Energía Eléctrica se pueden observar en la Figura 64.

Para esa Figura, las corrientes que fluyen a través de la línea trifásica son respectivamente :

$$I_R = I_m \text{ Sen}(wt - 120) \quad (96.1)$$

$$I_S = I_m \text{ Sen } wt \quad (96.2)$$

$$I_T = I_m \text{ Sen}(wt + 120) \quad (96.3)$$

Las tensiones inducidas debido a estas corrientes pueden obtenerse a partir de la ecuación (92).

$$\varepsilon_R = - \frac{\mu_0 w I_m L}{2 \pi} \ln \frac{\text{Cos } \beta_2}{\text{Cos } \beta_1} \cdot \text{Cos}(wt - 120) \quad (97.1)$$

$$\varepsilon_S = - \frac{\mu_0 w I_m L}{2 \pi} \ln \frac{\text{Cos } \beta_4}{\text{Cos } \beta_3} \text{Cos } wt \quad (97.2)$$

$$\varepsilon_T = - \frac{\mu_0 w I_m L}{2 \pi} \ln \frac{\text{Cos } \beta_6}{\text{Cos } \beta_5} \cdot \text{Cos}(wt + 120) \quad (97.3)$$

Reemplazando en las ecuaciones anteriores los valores constantes de $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ y $w = 377$, se obtiene :

$$\varepsilon_R = 7.54 \times 10^{-5} I_m L \ln \frac{\text{Cos } \beta_2}{\text{Cos } \beta_1} \text{Cos}(wt + 120) \quad (98.1)$$

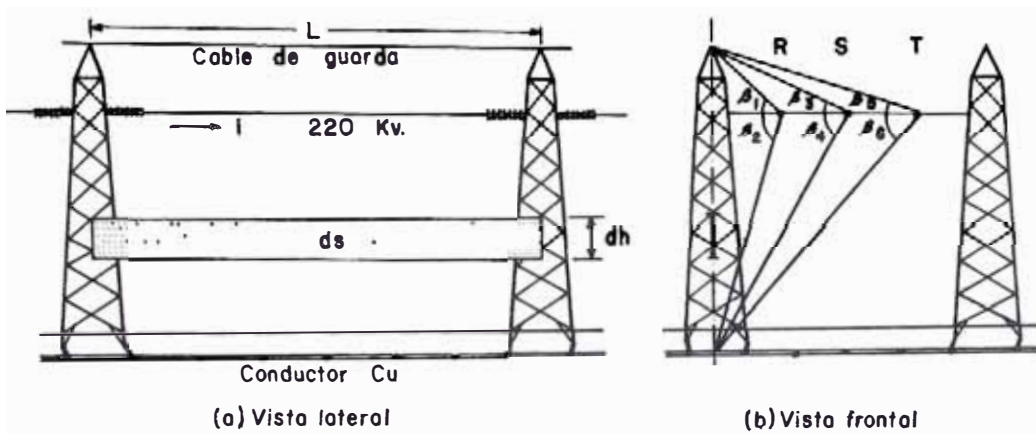


Figura 64.- Modelo de un lazo cerrado en una subestación

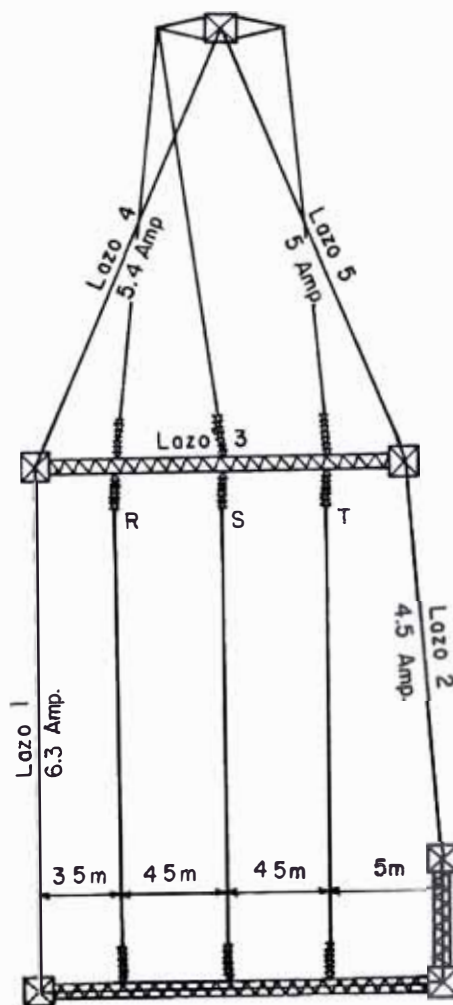


Figura 65.- Vista de planta de la llegada de la línea Lima-Pisco

$$\varepsilon_S = 7.54 \times 10^{-5} \text{ Im L ln} \frac{\cos \beta_4}{\cos \beta_3} \cos wt \quad (98.2)$$

$$\varepsilon_T = 7.54 \times 10^{-5} \text{ Im L ln} \frac{\cos \beta_6}{\cos \beta_5} \cos (wt - 120) \quad (98.3)$$

la tensión inducida total a lo largo de todo el lazo es igual a la suma de las tensiones inducidas debidas a cada fase.

$$\varepsilon_{\text{TOTAL}} = \varepsilon_R + \varepsilon_S + \varepsilon_T \quad (99)$$

el valor eficaz de esta tensión inducida será :

$$\varepsilon_{\text{Eficaz}} = \frac{\varepsilon_{\text{TOTAL}}}{\sqrt{2}} \quad (100)$$

la corriente inducida será por lo tanto :

$$I_{\text{ind}} = \frac{\varepsilon_{\text{TOTAL}}}{\sqrt{2} Z_{\text{Total}}} \quad (101)$$

donde Z_{total} es la suma de las impedancias de las componentes del lazo.

3.4.4 Resultados Experimentales

La Figura 65, muestra la vista de planta de los pórticos de llegada a la Subestación San Juan de ELECTROPERU de la Línea Pisco - Lima, en cuya infraestructura se analizará la constitución de lazos cerrados de corrientes inducidas, debido al paso de la corriente circulante en la línea antes mencionada.

Los lazos 1 y 2 están formados por el cable de guarda, los soportes de los pórticos y los conductores de la malla de puesta a tierra; el lazo 3 se forma a través de la estructura completa del pórtico (P1) y los conductores de la malla de puesta a tierra; mientras que los lazos 4 y 5

están formados por la torre de Llegada (T1), el cable de guarda, los soportes del Pórtico (P1) y los contrapesos que van desde la malla de puesta a tierra hasta la torre (T1). Los valores medidos de las corrientes inducidas en cada lazo también se indican en la Figura 65.

Para el análisis de los lazos 1, 2 y 3 es necesario hacer una aproximación del perfil del conductor en su recorrido dentro del Patio de Llaves, tal como se muestra en la Figura 66, para el lazo 2. Los lazos 4 y 5 también pueden ser analizados en forma semejante, aunque para estos casos hay que considerar la división del vano entre la torre de Llegada (T1) y el pórtico (P1) en varios tramos iguales, como se observa en las Figuras 67 a, b y c). El cálculo de las tensiones inducidas en cada uno de los tramos de un lazo se logra haciendo uso de las ecuaciones 98.1, 98.2 y 98.3; siendo la tensión inducida total en un lazo, la suma de todas estas tensiones parciales. Finalmente la corriente inducida que circula en el lazo considerado se obtiene al dividir la tensión inducida total entre la impedancia del lazo.

Las Figuras 68 a y b), muestran los valores de las corrientes inducidas obtenidas por medición y en forma analítica en seis puntos de la parte del Patio de Llaves correspondiente a la Figura 68, valores que también se encuentran resumidos en la Tabla XV. El valor de la corriente inducida en un punto específico, resulta de la suma de las corrientes correspondientes a los lazos que puedan tener como elemento al punto tomado para el análisis o medición. Las mediciones llevadas a cabo fueron hechas con un amperímetro de pinzas de Tipo Analógico.

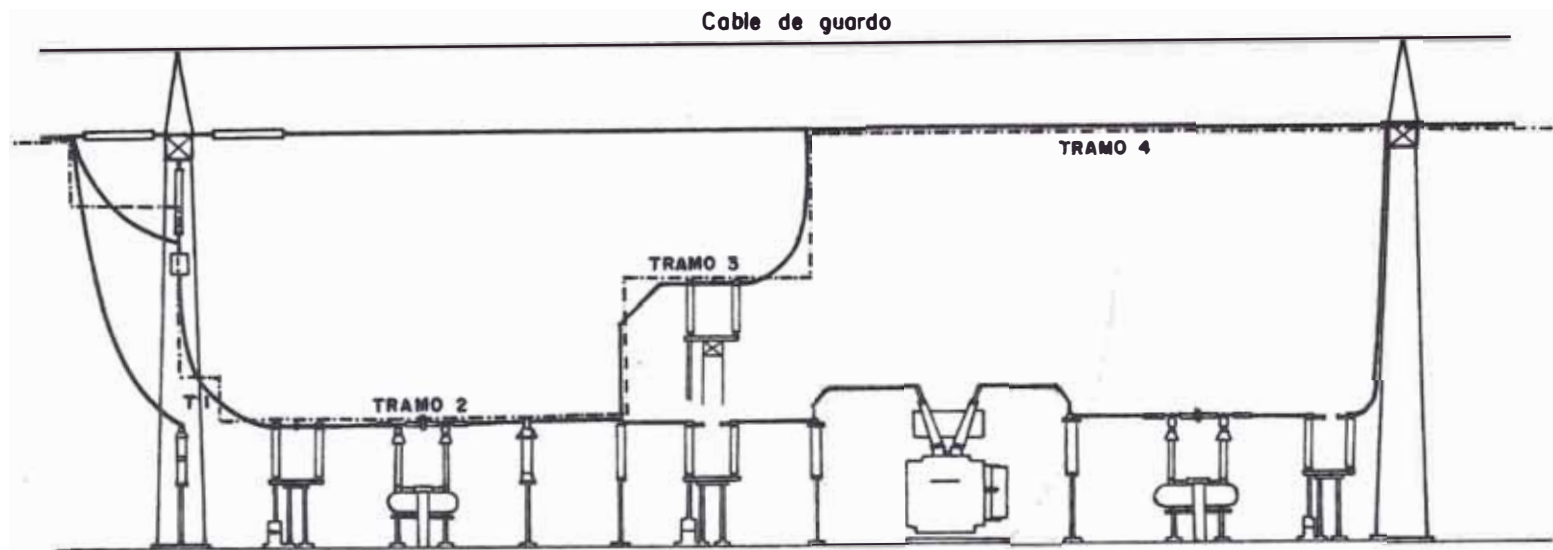
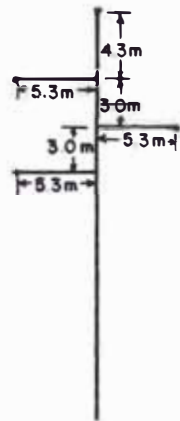
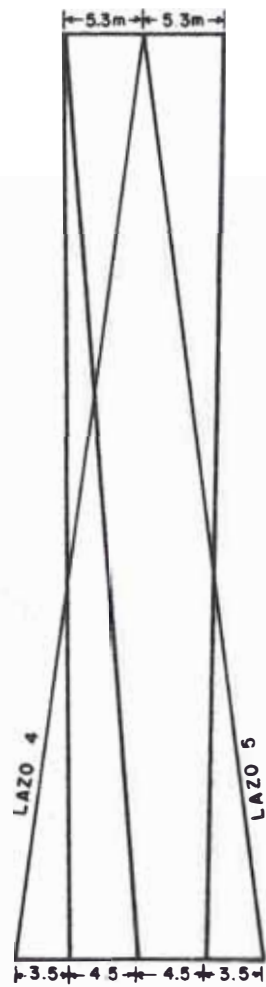


Figura 66.- Aproximación del perfil del conductor en su recorrido dentro del patio de llaves

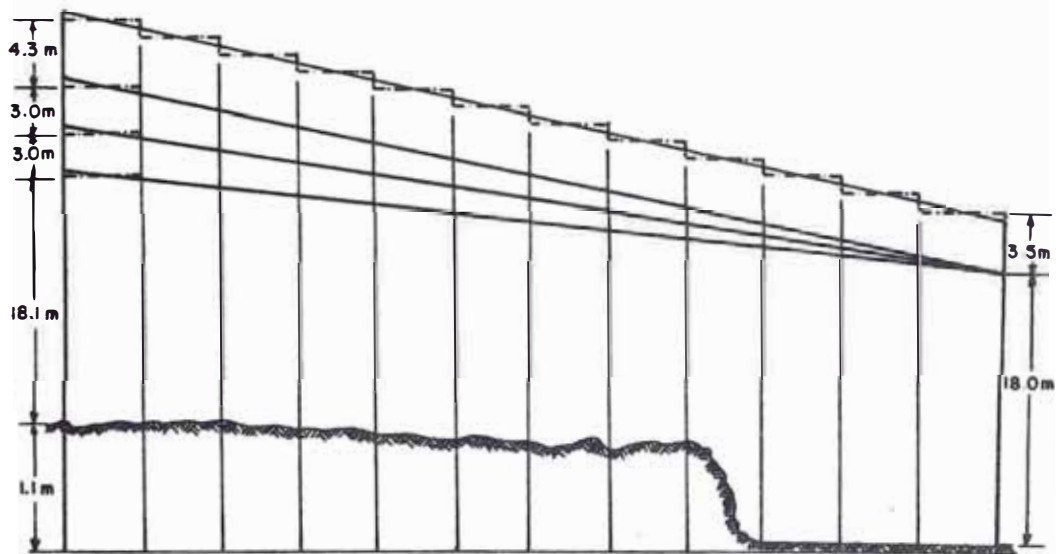
————— Recorrido real del conductor
 - - - - - Recorrido aproximado



(a) Estructura de llegada

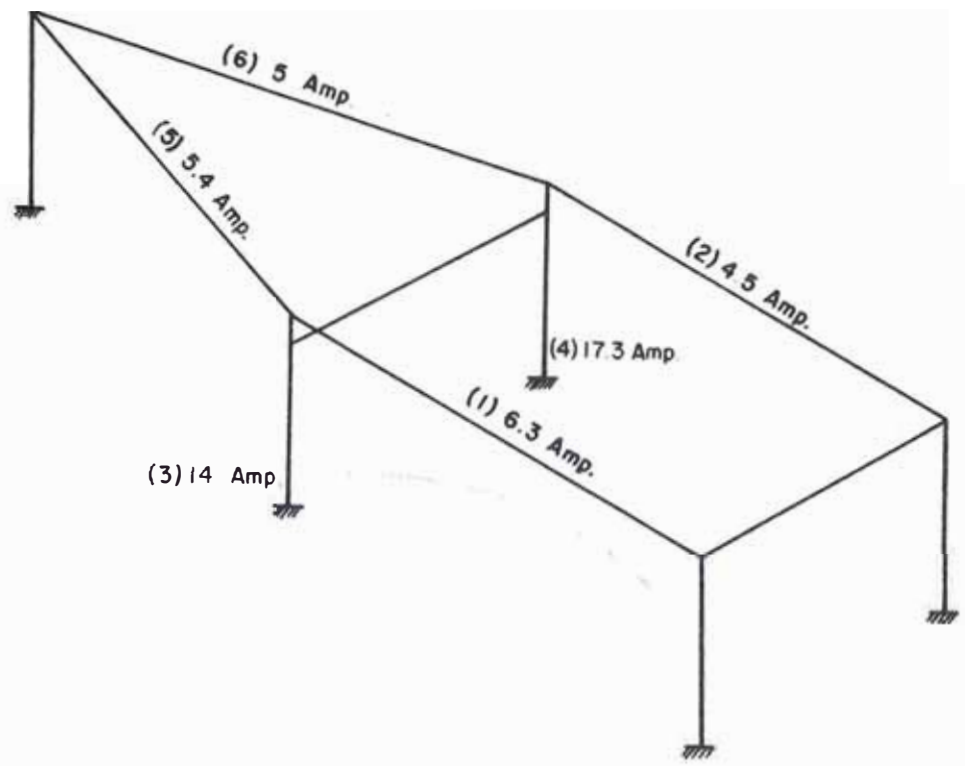


(b) Vista de planta de la llegada a la subestación

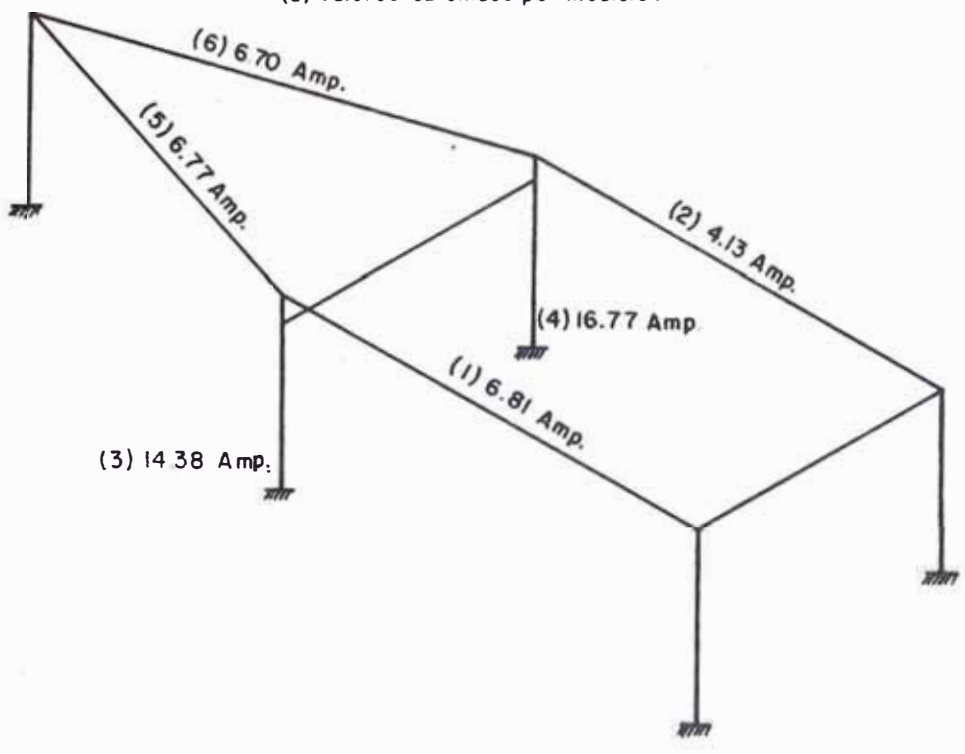


(c) Representación de los lazos 4 y 5 por tramos

Figura 67.- Formación de lazos cerrados entre el portlco de la subestación y la primera torre de la línea de transmisión



(a) Valores obtenidos por medición



(b) Valores obtenidos en forma analítica

Figura 68.- Corrientes inducidas en la llegada de la línea Lima-Pisco

TABLA XV

Punto de Medición	Valor Medido (Amperios)	Valor Calculado (Amperios)
1	6.3	6.81 <u>74.93</u>
2	4.5	4.13 <u>-129.21</u>
3	14.0	14.38 <u>- 54.31</u>
4	17.3	16.77 <u>- 89.15</u>
5	5.4	6.77 <u>11.75</u>
6	5.0	6.70 <u>64.70</u>

CAPITULO IV

INTRODUCCION DE CORRECCIONES Y MODALIDADES DE MANTENIMIENTO

4.1 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LINEAS

Debido al papel primordial que desempeñan las líneas de transmisión en el transporte de la Energía Eléctrica, resulta necesario tener estas instalaciones en las mejores condiciones de funcionamiento; por lo tanto siendo la resistencia de puesta a tierra de sus estructuras uno de los factores influyentes en su comportamiento, es primordial mantener este parámetro debajo de un valor mínimo, para evitar problemas relacionados con las descargas atmosféricas o potenciales peligrosos para el personal que se encuentre en las cercanías de una estructura. A continuación serán mostrados algunos procedimientos para mejorar la Resistencia de Puesta a Tierra de las estructuras de una Línea de Transmisión.

4.1.1 Sistema de Contrapesos

Es una de las técnicas más conocidas para mejorar la Resistencia de Puesta a Tierra de las estructuras de una Línea de Transmisión, sobre todo cuando la capa superior del terreno donde se va enterrar el Contrapeso tiene una resistividad mayor a los 100 Ohmios-Metro; aunque en terrenos con resistividad muy elevada su contribución para disminuir la Resistencia de Puesta a Tierra no es muy significativa, como ocurre en las Torres 9 y 10 de la Línea

Mantaro - Lima. Algunos arreglos de contrapesos que pueden ser utilizados para el mejoramiento de Puestas a Tierra son mostrados en la Figura N° 69.

La efectividad de este tipo de Electrodos está relacionada directamente con su comportamiento ante sobretensiones transitorias como son las descargas atmosféricas, por lo que se recomienda un estudio detallado de su respuesta dinámica y estática para cada tipo particular de terreno y de esta manera escoger la longitud apropiada del contrapeso que garantice una impedancia de impulso capaz de evitar un Contorneo en la Línea de Transmisión.

Además, al utilizar esta clase de electrodos hay que resaltar que la profundidad de enterramiento no influye mayormente en su resistencia, por lo que esta magnitud debe ser adoptada de tal manera que evite su depredación, procurando tenderlos siempre en capas de terreno de baja resistividad, o en todo caso hacer el relleno de la zanja con tierra de origen vegetal o, bentonita. Por otro lado, el incremento del número de contrapesos disminuye la impedancia transitoria del sistema de contrapesos (13), como se puede observar en la Figura N° 70.

4.1.2 Sistema de Jabalinas Profundas

En la mayoría de los casos, la segunda o tercera capa de los terrenos presenta una resistividad más baja que la primera capa, lo cual induce a considerar la utilización de electrodos verticales cuya profundidad de penetración alcance la capa de baja resistividad del terreno. Esta metodología es recomendable de manera especial para lugares donde la napa freática se encuentra a una profundidad pequeña, como ocurre en la zona del Valle de Ica y alrededores.

El armado de estas jabalinas profundas, se logra mediante el acoplamiento de varias piezas de una longitud aproximada de 3 metros (10 Pies), unidas por pequeñas uniones roscadas (nipples), procurando evitar

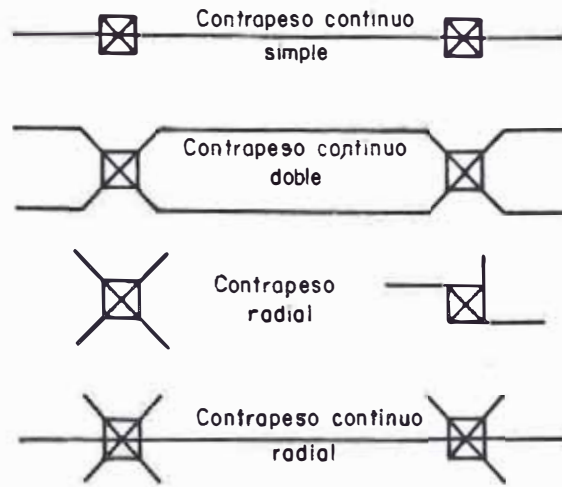
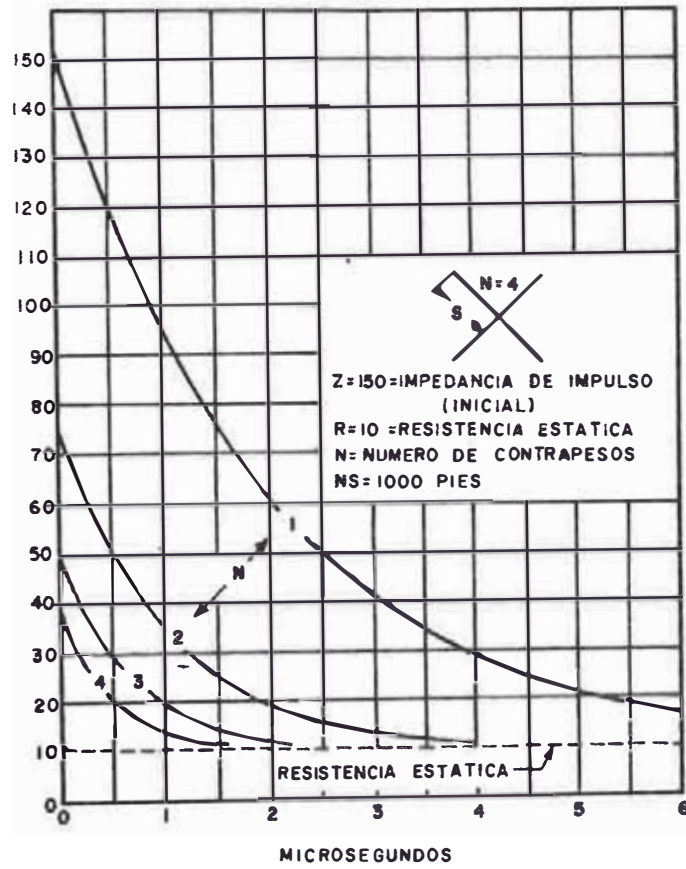


Figura 69 - Arréjlo de contrapesos



Figuro 70.- Efecto del número de contrapesos en lo impedancia del sistema total de contrapesos

una resistencia de contacto significativa entre las piezas a unir. El clavo de estos dispositivos se efectúa utilizando un taladro y un martillo neumáticos.

El número óptimo de jabalinas en paralelo que pueden ser utilizadas en el mejoramiento de la Puesta a Tierra de una estructura es cuatro, por cuanto un incremento mayor a este número de jabalinas en profundidades usuales, no va a influir sustancialmente en la disminución de la Resistencia de Puesta a Tierra, tal como se observa en la Figura N° 72 ; haciendo notar que la separación entre estas jabalinas debe ser mayor que la longitud de su inmersión para mejorar su eficiencia (Figura N° 72). El diámetro de estos electrodos no influye mayormente en la disminución de la resistencia de puesta a tierra del sistema de jabalinas profundas.

4.1.3 Pozos Tubulares con Rellenos Especiales

Una manera muy común para lograr una resistencia de puesta a tierra baja es utilizando pozos tubulares con rellenos especiales como Carbón Vegetal, Coque, Estiércol de Ganado, Pirita de Hierro, Escoria de Cobre, Sal Industrial, Sal de Piedra, Bentonita, etc.; los cuales pueden ser utilizados en forma independiente o combinándolos en capas o en una mezcla según la disponibilidad, eficiencia y costo de estos productos.

Dentro de los materiales mencionados anteriormente cabe resaltar a la bentonita, cuyo relleno ideal se obtiene al mezclar su volumen en seco por cuatro a seis veces el volumen de agua utilizada, dependiendo de la calidad de la bentonita. La principal característica de este producto es que mantiene la humedad en forma casi permanente a pesar del transcurso del tiempo, asegurando además un excelente contacto entre el electrodo y el terreno circundante. La resistividad promedio de la bentonita es de 2.5 ohmios-metro a 300 % de humedad (peso de agua/peso de bentonita x 100, aproximadamente 6 veces su volumen en seco), e inclusive puede ser menor cuando la bentonita es mezclada en solución salina, lo

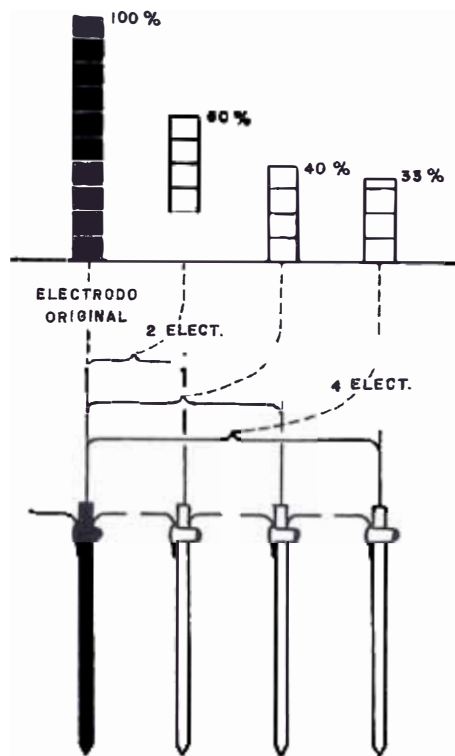
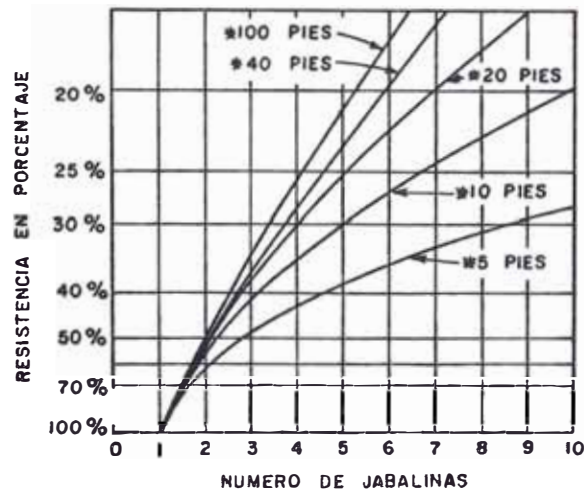


Figura 71 - Resultados promedio del porcentaje de disminución de la resistencia de puesta a tierra por efecto de varias jabalinas en paralelo



*Separación entre jabalinas

Figura 72.- Resistencia comparativa de electrodos de puesta a tierra múltiples (Jabalina simple igual al 100% de R)

cual da una mayor efectividad al relleno.

Estudios experimentales en suelos de alta resistividad, en los que se utilizaron diferentes tipos de relleno en pozos tubulares, mostraron que la combinación de capas alternadas de bentonita y sal industrial, ofrecen mayor efectividad entre todos los rellenos utilizados. Para evitar la corrosión de los electrodos se recomienda el uso de sal de piedra en lugar de sal industrial.

4.1.4 Tratamiento Químico del Terreno

En caso de que con los procedimientos anteriores no se logren resultados óptimos, es posible recurrir al tratamiento químico del terreno en los alrededores de los electrodos de puesta a tierra. Algunos de los productos químicos que pueden utilizarse son : Sulfato de Magnesio, Sulfato de Cobre, Carbonato de Sodio, Sal de Piedra o también Sal Industrial; los cuales deben ser aplicados diluidos en agua, tratando de que se esparzan lo mayor posible en el terreno circundante a los electrodos.

El tiempo de efectividad del tratamiento químico no es permanente y varía de acuerdo con la permeabilidad del suelo, existiendo casos en que pueden pasar muchos años para que se requiera de un nuevo tratamiento o en caso contrario puede ser casi nulo cuando el terreno es demasiado poroso o existe un excesivo flujo de agua a través del suelo debido principalmente a las lluvias. La dispersión inmediata de los productos químicos puede ser retardada por la acción de ciertas sustancias como son los gels, que actualmente son comercializados con diversos nombres : Laborgel, Chicogel, Sanick Gel, etc.

Una de las principales ventajas del tratamiento químico del terreno es la reducción de la variación estacional de la resistencia de puesta a tierra, producto del humedecimiento y resecado alternativo del terreno, (Figura N° 73); sin embargo, presenta ciertas dificultades relacionadas con

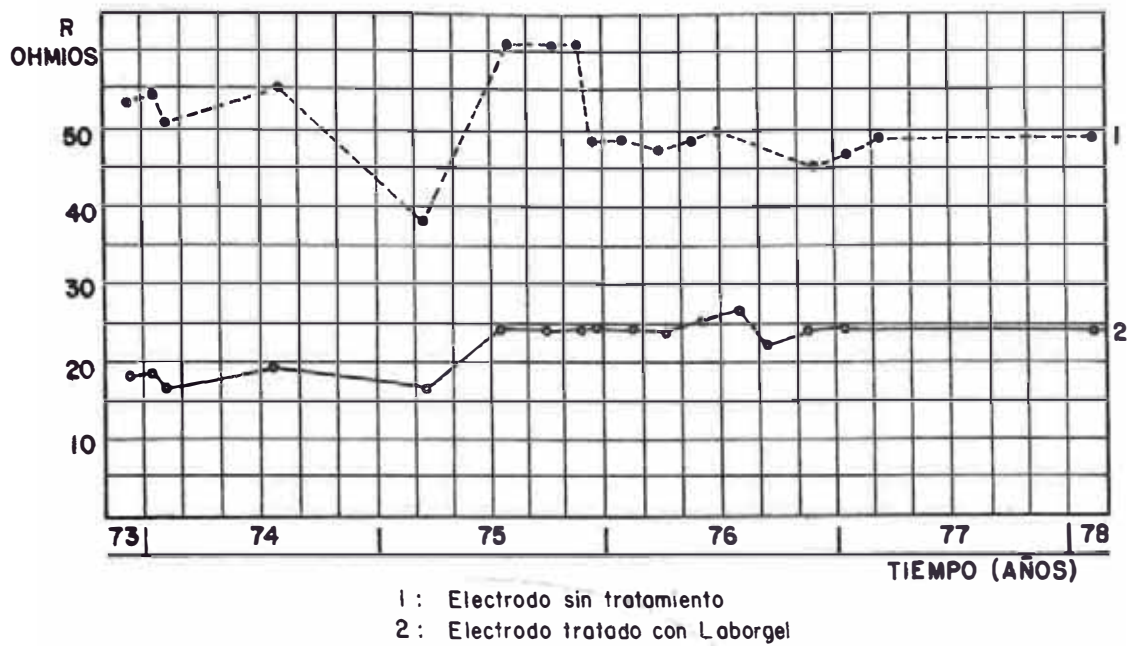


Figura 73.- Variación estacional de la Resistencia de Puesta a Tierra de dos tipos de electrodos

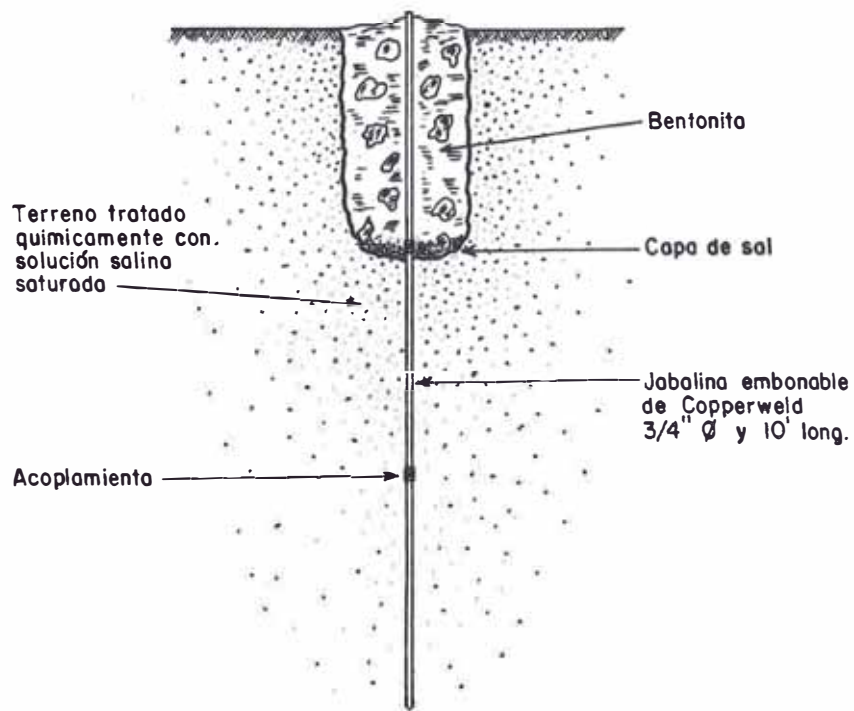


Figura 74.- Pozo de Puesta a Tierra utilizando Jabalinas Profundas y tratamiento químico del terreno

la corrosión, sobre todo si se usa sal común o industrial y no se sigue ni
gún procedimiento especial que evite este inconveniente. De los prod
tos mencionados, el menos corrosivo es el Sulfato de Magnesio; aunque es
más recomendable el uso de la Sal de Piedra por tener un menor costo eco
nómico y a la vez ser menos corrosiva que la sal común o industrial. La
Figura N° 74, muestra la configuración de un pozo de puesta a tierra en
el que se utiliza una jabalina profunda y un relleno de bentonita con Sal
de Piedra o Industrial, previo tratamiento químico del terreno con solución
salina saturada.

4.2 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE ESTACIONES TRANSFORMADORAS

Cuando se trata de mejorar la puesta a tierra de una Estación
Transformadora no solamente hay que buscar obtener una baja resistencia,
ya que este parámetro por sí solo no nos garantiza una seguridad absoluta,
sino que también deben verificarse los potenciales que puedan ocurrir den
tro y en los alrededores de la malla de las subestaciones y analizar las co
rrecciones que se puedan adoptar.

Por lo general la disminución de la resistencia de puesta a
tierra de la malla va a disminuir también la máxima elevación de poten
cial de la malla y de esta manera los potenciales de toque y paso, objeti
vo que puede ser logrado utilizando las mismas metodologías seguidas en el
caso de las Líneas de Transmisión; aunque existen procedimientos que pue
den ser empleados en forma más exclusiva cuando se trata de corregir el
sistema de puesta a tierra de Estaciones Transformadoras, los cuales serán
descritos a continuación.

4.2.1 Aumento de las Dimensiones de la Malla de Puesta a Tierra

Es una de las maneras más efectivas para disminuir la resisten
cia de puesta a tierra de una malla, principalmente cuando se cuenta con

un área disponible para hacer el agrandamiento de la malla, lo cual a veces no es posible y se tiene que recurrir a la utilización de jabalinas profundas o pozos con rellenos especiales.

4.2.2 Disminución del Espaciamiento de los Conductores de la Malla

Con este procedimiento se logra disminuir los gradientes de potencial dentro del área de la subestación; sin embargo, en el perímetro de la malla van a subsistir los problemas de potenciales peligrosos, los cuales pueden ser subsanados enterrando dos o más conductores en paralelo alrededor del perímetro de la malla, a profundidades mayores a medida que la distancia a la subestación aumenta.

4.2.3 Empleo de una Capa Superficial de Alta Resistividad

La finalidad de esta corrección es aumentar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas que se encuentran en la Subestación, reduciendo de esta manera la corriente que pueda circular a través del cuerpo humano durante el evento de una falla. Los materiales más comúnmente empleados en este tipo de correcciones son la piedra chancada y el cascajo de río, a los cuales se les asigna una resistividad promedio de 3,000 ohmios - metro cuando se encuentran en estado húmedo. Para una buena efectividad de esta capa es necesario que tenga un espesor de 10 á 15 centímetros, ya que de otra manera podría dejar al descubierto el suelo o dar lugar a la formación de charcos.

4.2.4 Interconexión con Otros Sistemas de Puesta a Tierra

Práctica que dará como resultado la desviación de parte de la corriente de falla por otros caminos cuya resistencia de puesta a tierra es lo suficientemente baja, tales como la puesta a tierra de estaciones transformadoras cercanas o estructuras de las líneas de transmisión que entran o salen de la Subestación, a las cuales pueden interconectarse por interme

dió del cable de guarda o electrodos enterrados horizontalmente.

4.2.5 Limitación de la Corriente de Falla

Esto puede ser logrado poniendo a tierra los sistemas eléctricos a través de resistencias, reactancias, bobinas de Peterson o transformadores de puesta a tierra, dando como resultado la disminución de la elevación total del potencial de la malla y por ende los gradientes de potencial. Este procedimiento por lo general resulta poco práctico, ya que en muchos casos va a incrementar el peligro en lugar de disminuirlo.

4.3 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN EDIFICACIONES ESPECIALES

Las correcciones de puesta a tierra en edificaciones especiales también pueden ser hechas empleando alguno de los procedimientos descritos para el caso de líneas de transmisión y estaciones transformadoras, aunque en ciertas ocasiones es necesario ejecutar otras correcciones que serán descritas a continuación.

4.3.1 Humedecimiento Permanente del Sistema de Puesta a Tierra

Generalmente el valor de la resistencia de puesta a tierra necesaria para el buen funcionamiento de los equipos de laboratorio, sistemas de comunicación, computadoras, etc., son bajos, realidad que en la mayoría de los casos no puede ser lograda porque no se ha considerado en el diseño original de las edificaciones, un sistema de puesta a tierra apropiado. En tales circunstancias se recomienda el humedecimiento permanente del sistema de puesta a tierra a través de sistemas especiales de riego, diseñados para funcionar con un intervalo de tiempo adecuado y ubicados en lugares que no perjudiquen la estética, ni la parte estructural de las edificaciones como jardines, piletas ornamentales, etc. Una de las bondades de esta corrección es que no permite mucha variación de la resistencia de

puesta a tierra con el transcurso del tiempo.

4.3.2 Sistemas de Puesta a Tierra Periféricos

En algunas ocasiones es posible encontrar en las cercanías a las edificaciones, zonas con resistividades relativamente bajas, tales como ríos, manantiales, lagunas, terrenos con resistividad baja, etc., en los cuales se puede ejecutar un sistema de puesta a tierra con la resistencia requerida para el funcionamiento de los equipos. En estos casos es necesario cuidar que la distancia entre la edificación y el sistema periférico no sea muy grande, para evitar problemas con la impedancia dinámica del contrapeso que los une.

4.4 DIRECTRICES PARA MANTENIMIENTO

Una vez realizada la medición de resistencia de puesta a tierra, puede surgir la necesidad de programar el mantenimiento, para lo cual se tienen que establecer previamente un conjunto de procedimientos que deben ser respetados durante la ejecución del Programa de Mantenimiento.

4.4.1 Objetivo

4.4.1.1 Las presentes especificaciones están dirigidas principalmente al mantenimiento de Líneas de Transmisión, aunque también pueden ser adaptadas para los casos de Estaciones Transformadoras y edificaciones especiales que tienen aterramientos.

4.4.1.2 Con la observación de las directrices que se mencionan nos proponemos los siguientes objetivos :

- a. Obtener una magnitud de resistencia de puesta a tierra que permita un alto grado de confiabilidad a la operación de la línea, evitando salidas de servicio ocasiona

das por las descargas atmosféricas.

- b. Evitar accidentes ocasionados por las tensiones de Toque y de Paso elevadas, que puedan existir en los alrededores de las estructuras, principalmente cuando se encuentran ubicadas en zonas urbanas o peatonales.
- c. Permitir un eficiente funcionamiento del sistema de protección.

4.4.2 Procedimiento para el Mantenimiento

4.4.2.1 Estudio del Tipo de Suelo

Para la realización de un estudio completo del tipo de suelo donde se encuentra la puesta a tierra es necesario seguir la siguiente secuencia :

- a. Apreciación visual del tipo de material que constituye la superficie del suelo, es decir arcillosa, tierra seca, tierra húmeda, tierra pedregosa, tierra aluvional, arena eólica, arena eriaza, arena pedregosa, pedregal grueso, roca estratificada, roca granítica, arenisca cuarzosa, etc. sin embargo esta apreciación no es necesariamente determinante para tomarla como única referencia en las actividades de corrección de puestas a tierra.
- b. Estimación cuantitativa de las características eléctricas del suelo a través de mediciones de resistividad, que permitirán conocer el valor de estos parámetros y la profundidad de cada una de las capas del suelo. Los resultados obtenidos pueden ser verificados físicamente haciendo una excavación para obtener un corte transversal del terreno, que permita observar la profundidad y

características de cada una de sus capas.

- c. Análisis de los componentes químicos del suelo, para lo cual se tomará una muestra de tierra de los estratos del suelo en los que se va a enterrar la mayor parte del sistema de puesta a tierra. Este análisis permitirá comprobar de manera fehaciente las características con ductivas del suelo, pues contaremos con información re ferente a los porcentajes de cada uno de sus componentes, cuyas cualidades físico - químicas son conocidas de antemano y pueden facilitar la aplicación de tratamientos.
- Componentes con alta resistividad : Oxido de Silicio, Oxido de Aluminio.
 - Componentes con baja resistividad : Sulfatos, Cloruros, Carbonatos, Sales, Bases y Metales.

4.4.2.2 Elección del Tipo de Electrodos

La elección del tipo de electrodos depende de los resultados que se obtengan de la exploración de resistividades del suelo y del objeti vo al cual está destinado el sistema de puesta a tierra a corregir; el mis mo que condicionará los valores máximos permitidos para los gradientes de potencial y la resistencia de puesta a tierra necesarios para el funcio namiento eficiente de la Línea de Transmisión. Una vez realizada la elección se procederá a la verificación teórica de los parámetros asociados a este sistema de puesta a tierra, haciendo paralelamente comparaciones con otros tipos de electrodos que sean factibles de utilizar en el manteni miento.

A continuación se dan ciertas pautas para la elección apropia da de los electrodos durante la corrección de puestas a tierra.

a) Utilización de Anillos Concéntricos

En caso de existir gradientes de potencial peligrosos alrededor de los soportes de una línea de transmisión, utilizar anillos concéntricos alrededor de cada soporte a profundidades cada vez mayores a medida que el anillo se aleja de la base de la estructura.

Los anillos pueden ser de forma circular o cuadrada, con una distancia máxima entre ellos de 2 metros y deberán estar ligados entre sí por un conductor del mismo material. Este tipo de correcciones es recomendable para estructuras ubicadas en zonas urbanas o donde haya circulación de personal.

b) Utilización de Electrodo Verticales

Para suelos con resistividades menores a 50 ohmios-metro, utilizar uno o más electrodos verticales unidos entre sí, en un número máximo de cuatro, clavados en forma directa sin ningún tratamiento especial. Para suelos con resistividades mayores a los 50 ohmios -metro probar con el mismo procedimiento, pero utilizando pozos tubulares con rellenos especiales para cada electrodo, previo tratamiento químico del terreno antes del relleno.

c) Utilización de Electrodo Verticales Profundos

En caso de tener una estructura del suelo, en la que una de las capas inferiores tenga menor resistividad que las capas superiores clavar electrodos verticales ambonables profundos hasta alcanzar la capa de baja resistividad. Al igual que los electrodos verticales simples cuando no se logre la resistencia requerida, realizar pozos tubulares con rellenos especiales previo tratamiento químico del terreno, específicamente la parte superior del electrodo profundo.

d) Utilización de Electrodo Horizontales o Contrapesos

Para suelos con una capa superficial mayor a los 100 ohmios -metro, utilizar electrodos horizontales con una longitud tal que evite un comportamiento dinámico perjudicial, ca

racterística que debe ser verificada utilizando algún procedimiento analítico (Anexo V).

El calibre del conductor debe ser escogido siguiendo el criterio recomendado en Std - 80 de la IEEE (10.5), aunque no influye mayormente en la disminución de la resistencia de puesta a tierra.

En caso de resistividades mayores a los 1000 ohmios -metro se recomienda realizar el tratamiento químico de la zanja antes del tendido del conductor, rellenándola posteriormente con algún relleno especial.

e) Utilización de la Fundación de las Estructuras

En lugares donde la resistividad del terreno es elevada y no se ha logrado disminuir la resistencia de puesta a tierra con los electrodos mencionados anteriormente, probar con la ejecución de pozos tratados químicamente alrededor de los soportes de las estructuras, aún cuando estas fueran fundaciones de concreto. Estos pozos deberán ser rellenados con mezclas especiales y tratando de no afectar la estabilidad de las estructuras.

En zonas donde no se tenga problemas de corrosión, librar a la fundación de la capa de brea adherida a ella.

4.4.2.3 Tratamiento Químico del Terreno y Productos de Relleno

A fin de mejorar el comportamiento de los electrodos utilizados en las correcciones de puesta a tierra, es conveniente realizar el tratamiento químico del terreno adyacente a los electrodos y a la vez rellenar con productos apropiados las excavaciones que se hagan para enterrar estos dispositivos, para lo cual se dan las siguientes recomendaciones :

a) Efectuar las excavaciones para enterrar los electro
dos de manera que en ellas se pueda verter una
cantidad considerable de solución química. El grado de mejoramiento de
la puesta a tierra dependerá de la cantidad de solución empleada, aunque
esto tiene un cierto límite por cuanto el terreno tiende a saturarse confor
me se va aumentando la solución.

b) Los productos recomendados para el tratamiento
químico del terreno son soluciones de sulfato de
magnesio, sulfato de cobre, sal común, sal de piedra, etc., siendo el más
fácil de obtener y más económico el tratamiento con solución salina satura
da, lograda al diluir 25 Kg. de sal por cada metro cúbico de agua.

c) Hecho el tratamiento químico se procede al tendi
do o clavado de los electrodos, después de lo
cual se debe proceder al relleno de las excavaciones, tratando de cubrir
a los electrodos en su totalidad, previa conexión de estos dispositivos a
las estructuras por corregir.

d) Los productos recomendados para realizar el relle
no son : bentonita, tierra vegetal, carbón, coque,
pirita de cobre, escoria de hierro, laborgel, sanick gel, etc. Por conside
raciones económicas y técnicas se tiende a generalizar la utilización de
bentonita mezclada con tierra vegetal. La bentonita puede ser preparada
empleando solución salina saturada.

4.4.2.4

Modo de Instalación

Para lograr una instalación eficiente en el mantenimien
to de los sistemas de puesta a tierra es necesario tener en consideración lo
siguiente :

a) Verificar el perfecto estado de los electrodos a
utilizar, sobre todo que se encuentren libres de

cualquier tipo de corrosión.

- b) La profundidad de enterramiento será de tal manera que evite su deterioro o depredación.
- c) Procurar lograr una baja resistencia de contacto en los empalmes o uniones, recomendándose la utilización de soldadura para evitar simultáneamente la corrosión de estas partes del sistema de puesta a tierra.
- d) Todos los electrodos deberán estar unidos entre sí y con la estructura mediante conductores de Cobre, enterrados en zanjas tratadas previamente con solución química y rellenas con materiales apropiados.

CONCLUSIONES

A lo largo del contenido de la presente Tesis, se ha podido mostrar la gran importancia para los Sistemas de Potencia del conocimiento cabal de la ciencia de la Puesta a Tierra, estudio que nos ha permitido obtener ciertas conclusiones que serán descritas a continuación.

5.1 CONCLUSIONES REFERENTES AL CAPITULO 1

5.1.1 Resulta primordial conocer el orden de magnitud de las corrientes de cortocircuito o de rayo, ya que a partir de este parámetro se podrán calcular los gradientes peligrosos o prever las irregularidades que puedan ocurrir dentro o en los alrededores de toda infraestructura eléctrica. Al respecto, cabe resaltar la gran ayuda que prestan los programas digitales elaborados para estos casos.

5.1.2 Los valores de corrientes de cortocircuito obtenidos para el Sistema Interconectado (ANEXO I), corroboran lo anotado en el Capítulo 2, referente al caso más desfavorable de falla, que en la mayoría de casos resulta ser la falla monofásica a tierra. Por otro lado, cuando en una Subestación se tienen diferentes niveles de tensión, la mayor magnitud de corriente de cortocircuito se produce generalmente en los niveles de tensión más bajos.

5.1.3 A fin de realizar un estudio más eficiente y completo del comportamiento de las descargas atmosféricas en nuestro medio, es necesario contar con la mayor cantidad de datos experimentales y de campo sobre este fenómeno, hecho que puede ser logrado implementando estaciones de medición en los lugares más críticos de nuestras líneas de transmisión.

5.1.4 Los valores de potenciales permisibles por una persona durante el evento de una falla, dependen directamente de la corriente tolerable por el cuerpo humano, que a la vez está en función del peso de las personas; por lo que para cálculos generalizados se debe considerar el peso promedio del personal o público que va a circular por el área donde se ubica la puesta a tierra. Así por ejemplo las tensiones de toque y paso permisibles por una persona con un peso promedio de 70 kgs. que se encuentra circulando sobre un suelo con una resistividad de 1000 ohmios - metro durante la ocurrencia de una falla con una duración de 0.5 segundos son de 555 y 1554 voltios respectivamente.

5.1.5 Las fórmulas referidas a las corrientes y potenciales tolerables por el cuerpo humano, son válidas para corrientes a 50 ó 60 Hz, por lo que deben hacerse las correcciones necesarias cuando se hagan análisis con sobretensiones transitorias, aunque es sabido que el cuerpo humano tiene un mejor comportamiento a frecuencias elevadas.

5.2 CONCLUSIONES REFERENTES AL CAPITULO 2

5.2.1 Para cálculos relacionados con el diseño de puesta a tierra se debe considerar que durante la ocurrencia de una falla, no toda la corriente de cortocircuito ingresa al sistema de puesta a tierra; sino que esta magnitud depende de diversos factores, entre los que sobresale el efecto del cable de guarda. Para cálculos preliminares se puede considerar que el 60 % de la corriente se distribuye a través de la puesta a tierra y el otro 40 % a través de los cables de guarda, recomendándose

el uso de un programa digital para un análisis más exacto.

5.2.2 Lo irregular y complicado de los actuales sistemas de pues
tas a tierra, instan a contar con programas digitales encami
nados a su diseño, con lo cual obtendremos resultados más precisos y ópti
mos, evitándonos de muchas asunciones y cálculos laboriosos.

5.2.3 Tener un valor de resistencia de puesta a tierra bajo, no es
indicativo de seguridad para el personal que pueda encontrar
se dentro del área de influencia de una edificación eléctrica, sino que es
ta cualidad está sujeta a los potenciales peligrosos que puedan ocurrir en
la edificación al momento de producirse una falla, motivo por el cual se
recomienda realizar las verificaciones de por lo menos las tensiones de to
que y paso, ya sea en forma analítica o a través de mediciones experimen
tales.

5.2.4 Bajo ciertas condiciones como son frecuencia y resistividad
del terreno elevadas y para ciertos tipos de electrodos, es
posible obtener impedancias de impulso menores que la resistencia estática
del sistema de puesta a tierra. Casos específicos de este fenómeno, pue
den ocurrir debido al impacto de rayos sobre torres de alta tensión ubica
das en lugares de resistividad elevada.

5.3 CONCLUSIONES REFERENTES AL CAPITULO 3

5.3.1 De acuerdo a las características y profundidad de los estra
tos de los terrenos donde se van a ubicar las diferentes edi
ficaciones eléctricas, el método más apropiado para las mediciones de resis
tividad es el de cuatro electrodos para la configuración de Wenner; cuyos
resultados pueden ser interpretados utilizando las curvas patrón característi
cas para cada número de estratos del terreno o utilizando el programa di
gital RESIS para suelo de dos capas.

5.3.2 Para medir el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra de una torre, es necesario aislar el cable de guarda que se encuentra conectado a su estructura; de lo contrario obtendremos resultados optimistas, debido a que estaremos midiendo la resistencia de puesta a tierra de la torre en paralelo con el cable de guarda. En la actualidad, existe un instrumento (Brown Boveri), capaz de medir la verdadera resistencia de puesta a tierra de una torre, sin necesidad de realizar el aislamiento del cable de guarda.

5.3.3 En Subestaciones de grandes dimensiones, con valores de resistencia de puesta a tierra menores de 0.5 ohmios, la componente reactiva va a tener un papel preponderante, motivo que lleva a considerar la medición de la impedancia de puesta a tierra y no tan solamente la resistencia. Por lo tanto, las mediciones no podrán realizarse con los instrumentos normalmente utilizados y será necesario contar con un método e instrumentos idóneos para estas eventualidades, como se muestra en el Artículo (41) de la bibliografía, donde se describen las características de funcionamiento de un instrumento capaz de medir las componentes reactiva e inductiva de la impedancia de un sistema de puesta a tierra.

5.3.4 Se ha demostrado que las corrientes circulantes en los lazos formados por el cable de guarda, las estructuras, los conductores de bajada a tierra y la malla de puesta a tierra, son originados por efectos de inducción electromagnética, causados a la vez por el flujo de corriente en los conductores de las líneas de transmisión o en las barras de las Subestaciones.

5.4 CONCLUSIONES REFERENTES AL CAPITULO 4

5.4.1 Una de las primeras medidas correctivas para mejorar el comportamiento de las líneas de transmisión ante el evento de las descargas atmosféricas, es el mejoramiento de la puesta a tierra de las es

estructuras; quedando como alternativas en caso de no obtener resultados satisfactorios, la implementación de un conductor adicional debajo de los conductores de fase para mejorar el acoplamiento entre los conductores y el cable de guarda o también el aislamiento diferencial de algunas fases de la línea de transmisión.

5.4.2 En terrenos de resistividades muy elevadas el procedimiento de corrección más apropiado es el tratamiento químico del suelo circundante a la estructura y la utilización de rellenos especiales en los pozos o excavaciones que se hagan para colocar los electrodos escogidos, resultando más efectivo el descubrimiento de las fundaciones de la estructura y luego realizar el procedimiento indicado anteriormente.

5.4.3 Para el caso de correcciones utilizando contrapesos no resulta muy conveniente su ejecución en suelos de baja resistividad, por cuanto tienden a incrementar su impedancia ante la ocurrencia de descargas atmosféricas, sobre todo cuando tienen una longitud grande. Sin embargo, pueden ser utilizados con mayor éxito en zonas con resistividades elevadas, en que la impedancia de impulso tiende a ser menor que la impedancia estática.

5.4.4 Es necesario tener una idea clara de la finalidad a la que está dirigida toda corrección de puesta a tierra, puesto que va a ser muy diferente la determinación que se tome cuando se trata de una corrección para la protección del personal, el funcionamiento eficaz del sistema de protección o la disminución de las salidas de servicio por descargas atmosféricas. En este último caso, habrá que hacer un análisis del comportamiento dinámico del sistema de puesta a tierra que se adopte.

BIBLIOGRAFIA

1. A.J. Eriksson, M.F. Stringfellow and D.V. Meal
"Lightning Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines"
IEEE, Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -101,
N° 4 April 1982.
2. R.Gómez V.
"Estudio de la Contaminación Aplicado a los Aislamientos Externos"
Escuela Nacional de Ingeniería Técnica - Tesis para optar el Título
de Ingeniero Técnico Electricista.
1974
3. Industrial and Commercial Power Systems Committee of the IEEE
Industry Applications Society
"IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial
Power Systems"
IEEE Standard N° 142 - 1972.
4. F. Vervloet
"Programa para Cálculo de Fallas de Cortocircuito"
5. IEEE Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society.
"IEEE Guide for Safety in Substation Grounding"
IEEE Standard N° 80 - 1976.
6. R.J. Heppe
"Computation of Potential at Surface above an Energized Grid or
Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Currents Distribution"
IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 98,
N° 6 Nov/Dec. 1979.
7. F.Dawalibi and D. Mukhedkar
"Parametric Analysis of Grounding Grids"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,
Vol. PAS-98, N° 5 Sep/Oct. 1979
8. L.G. Zukerman
"Simplified Analysis of Rectangular Grounding Grids"
IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems,
Vol. PAS-98, N° 5 Sept./Oct. 1979

- (9) J.G. Sverak, W.K. Dick, T.H. Dodds and R.H. Heppe
"Safe Substation Grounding - Part I"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100
N° 9 September 1981
- (10) I. Elgerd
"Electric Energy Systems Theory"
Mc Graw - Hill, Inc. 1971
- (11) Transmission Systems Committee of the IEEE Communications Society
"IEEE Guide for Determining the Maximum Electric Power Station
Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault"
IEEE Standard N° 367 - 1979
- (12) F. Har, Baden
"Detection by Line Protection of the Earth Fault Resistance"
Brown Boveri
- (13) J. Endrenyi
"Analysis of Transmission Tower Potentials During Ground Faults"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86,
N° 10 October 1967
- (14) Westinghouse Electric Corporation
"Electrical Transmission and Distribution Reference Book"
Copyright 1964
- (15) J. Yanque
"Apuntes de Clase - Curso de Alta Tensión"
Ciclo 1980 - I, Universidad Nacional de Ingeniería
- (16) G.W. Brown and S. Thunander
"Frequency of Distribution Arrester Discharge Currents Due to
Direct Strokes"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95
N° 5, Sept/Oct. 1976
- (17) M.A. Sargent and M. Daverniza
"Lightning Performance of Double - Circuit Transmission Lines"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 89,
N° 5/6 May - June 1970
- (18) C.M. Foust, B.C. Maine and C. Lee
"Lightning Stroke Protection at High Altitude in Peru"
AIEE June 1953

- (19) M. Daverniza, M.A. Sargent, G.J. Limbourn, L.Ah Choy, R.O. Caldwell, J.R. Currie, B.C. Holcombe, R.H. Stillman and R. Prowd
 "Modelling for Lightning Performance Calculations"
 IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 98, N° 6 Nov/Dec. 1979
- (20) R. Lundholm, R.B. Finn and W.S. Price
 "Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concepts"
 AIEE Transactions, pp. 1271 - 1283, February 1958
- (21) D. Mukhedkar
 "La Ciencia de la Puesta a Tierra de Sistemas de Energía"
 AEP Seminario Electrotecnia, Diciembre 1978
- (22) "Getting Down to Earth"
 Manual on Earth Resistance Testing for the Practical Man,
 Biddle Instruments
- (23) American Institute of Electrical Engineers
 "Guide for Safety in Alternating - Current Substations Grounding"
 AIEE Standard N° 80, March 1961
- (24) F.Dawalibi and W.G. Finney
 "Transmission Line Tower Grounding Performance in Non-Uniform Soil"
 IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, N° 2 March/April 1980
- (25) P. Kouteynikoff
 "Numerical Computation of the Grounding Resistance of Substations and Towers"
 IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 99, N° 3 May/June 1980
- (26) R.P. Nagar, R. Velázquez, M. Loelocian, D. Mukhedkar and Y. Gervais
 "Review of Analytical Methods for Calculating the Performance of Large Grounding Electrodes" - Part I - Theoretical Considerations
 Companion Paper Submitted to IEEE PES Winter Power Meeting, 1983
- (27) R. Verma and P. Barbeau
 "Design of a Low Resistance Grounding System for a Hydro - Electric Plant Located on Highly Resistive Soils"
 Paper F 77 731-3 presented at the IEEE PES Summer Meeting, México City, Mex., July 17 - 22, 1977

- (28) INVAP
"Especificaciones Para la Instalación de Puesta a Tierra"
Boletín INVAP, Investigación Aplicada - Argentina
- (29) T. Takashima, T. Nakae and R. Ishibashi
"High Frequency Characteristics of Impedance to Ground and Field Distributions of Ground Electrodes"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,
Vol. PAS - 100, N° 4, April 1981
- (30) R. Kosztaluk, M. Loboda and D. Mukhedkar
"Experimental Study of Transient Ground Impedances"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 100,
N° 11 November 1981
- (31) R. Velázquez and D. Mukhedkar
"Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior"
- (32) B.R. Gupta and B. Thapar
"Impulse Impedance of Grounding Grids"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 99,
N° 6 Nov/Dec.1980
- (33) R. Fieux, P. Kouteynikoff and F. Villefranque
"Measurements of the Impulse Response of Grounding to Lightning Currents"
- (34) C.J. Blattner
"Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Tests"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 101,
N° 8 August 1982
- (35) R. Velázquez
"Medición y Análisis de Resistividad del Suelo para Diseño de Mallas de Puesta a Tierra"
- (36) Institute of Electrical and Electronics Engineers
"IEEE Recommended Guide for Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth"
IEEE Standard N° 81 - 1962
- (37) G. Tagg
"Measurement of the Resistance of An Earth - Electrode System Covering a Large Area"
IEEE Proceedings, Vol. 116, March 1969

- (38) R. Velázquez, P.H. Reynolds and D. Mukhedkar
"Earth - Return Mutual Coupling Effects in Ground Resistance Measurements of Extended Grids"
Paper 82 SM 316-8 presented at the IEEE PES 1982 Summer Meeting, San Francisco, California, July 18 - 23, 1982
- (39) H. Go Sarmiento, R. Velázquez, J. Fortin and D. Mukhedkar
"Survey of Low Ground Electrode Impedance Measurements"
Paper 82 SM 396-0 presented at the IEEE PES 1982 Summer Meeting, San Francisco, California, July 18 - 23 1982
- (40) R. Verma and D. Mukhedkar
"Impulse Impedance of Buried Ground Wire"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 99, N° 5 Sep/Oct. 1980
- (41) P.H. Reynolds, D.S. Ironside, A.H. Silcocks and J.B. Williams
"A New Instrument for Measuring Ground Impedances"
Paper A 79 080 - 3 presented at the IEEE PES Winter Meeting, New York, February 4 - 9, 1979
- (42) F. Dawaliby, B. Bouchard, D. Mukhedkar
"Survey on Power System Grounding Design Practices"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 99, N° 4 July/Aug. 1980