



Escuela Politécnica del Ejército.

ESPE - Latacunga

**Facultad de ingeniería de Ejecución en
Electromecánica.**

TESIS DE GRADO

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE
PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS Y
PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN DE LA COMPANIA
“HELMERICH AND PAYNE DEL RIG 132”.**

CARLOS RAUL TASIPANTA S.

Latacunga Julio del 2002.

CERTIFICACION

Certificación que el presente trabajo fue realizado por el Sr CARLOS R. TASIPANTA SUNTASIG, bajo nuestra dirección.

Ing. Pablo Mena L.

DIRECTOR

Ing. Washinton Freire

CODIRECTOR

Latacunga, Julio del 2002.

AGRADICIMIENTO.

A la Escuela Politécnica del ejercito y al personal docente, por los conocimientos transmitidos a lo largo de la carrera para el desenvolvimiento en mi carrera profesional.

A la Compañía “ HELMERICH AND PAYNE”. Que por el intermedio del departamento de operaciones me han brindado los recursos y el apoyo necesario para el desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Pablo Mena L. y al Ing. Washinton Freire, por el aporte dado para la ejecución de este trabajo, así como también a las personas que contribuyeron en la culminación del presente estudio.

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres, que con su abnegada labor y comprensión hicieron posible que culminara uno más de mis objetivos planeados.

CONTENIDO.

| | Pág. |
|---|------|
| I. GENERALIDADES. | |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Principios básicos de puesta a tierra..... | 1 |
| 1.3 Origen y comportamiento de los rayos..... | 6 |
| 1.3.1 Poder de puntas..... | 11 |
| 1.4 Características y efectos del rayo..... | 13 |
| II. APANTALLAMIENTO. | |
| 2.1 Introducción..... | 15 |
| 2.1.1 Elementos básicos de un sistema de apantallamiento..... | 17 |
| 2.2 Tipos de apantallamiento..... | 23 |
| 2.2.1 Apantallamiento con hilo de guarda..... | 23 |
| 2.2.2 Apantallamiento con mástiles..... | 25 |
| 2.3 Proceso de las descargas atmosféricas..... | 26 |
| 2.3.1 Estadísticas de probabilidad de descargas atmosféricas..... | 29 |
| 2.3.2 Corrientes de rayos a tierra..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 2.3.3 Evaluación de la probabilidad de la caída de rayos o riesgo de exposición en una instalación..... | 34 |
| 2.3.4 Periodo de protección..... | 37 |
| 2.4 Zonas de protección para las descargas atmosféricas..... | 40 |
| 2.4.1 Método del Cono de protección..... | 44 |
| 2.4.2 Método de Radios de protección..... | 46 |
| 2.4.3 Método de Cilindros de protección..... | 47 |
| 2.4.4 Método de Link..... | 49 |
| 2.4.5 Método de volúmenes de colección..... | 51 |
| 2.5. Apantallamiento con elementos de ionización..... | 53 |

III. PUESTA A TIERRA.

| | |
|--|----|
| 3.1 Descripción de la necesidad de una puesta a tierra..... | 60 |
| 3.1.1 Distribución de corrientes y potenciales en suelos homogéneos.... | 62 |
| 3.2 Factores que influyen en la puesta a tierra..... | 64 |
| 3.2.1 La resistividad del suelo..... | 65 |
| 3.2.1.1 Proceso de la medición de la resistividad del suelo..... | 68 |
| 3.2.1.2 Proceso de la medición de la resistencia de una toma a tierra... | 76 |
| 3.2.2 Influencia del factor electrodo..... | 80 |
| 3.2.3 Tipos de tomas de tierra..... | 85 |
| 3.3 Clasificación de las puestas a tierras..... | 90 |
| 3.3.1 Puesta a tierra de funcionamiento u operación..... | 91 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3.2 | Puesta a tierra de protección..... | 95 |
| 3.3.3 | Puesta a tierra de trabajo..... | 96 |
| 3.4 | Partes que comprenden la puesta a tierra de protección..... | 96 |
| 3.5 | Determinación de los voltajes de toque y voltajes de paso..... | 99 |

IV DISEÑO DE LA PUESTA A TIERRA.

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Consideraciones generales de diseño..... | 107 |
| 4.2 | Electrodos de puesta a tierra varilla sencilla..... | 107 |
| 4.3 | Puesta a tierra con multiples varillas..... | 109 |
| 4.4 | Puesta a tierra con varillas químicas..... | 112 |
| 4.5 | Sistema de puesta a tierra con malla de tierra..... | 113 |

V METODOLOGÍA DEL APANTALLAMIENTO

| | | |
|----|---|-----|
| 1. | Levantamiento del plano físico..... | 121 |
| 2. | Determinación de la densidad de rayos a tierra..... | 121 |
| 3. | Cálculo del periodo de protección..... | 124 |
| 4. | Cálculo de los radios de protección utilizando distintos métodos..... | 125 |

VI METODOLOGÍA DE LA PUESTA A TIERRA.

| | |
|--|-----|
| 1. Levantamiento del diagrama unifilar del Sistema eléctrico de potencia.. | 134 |
| 2. Investigación de las características de la resistividad de la tierra..... | 134 |
| 3. Cálculo de la máxima corriente de falla fase – tierra..... | 135 |
| 4. Selección del tipo de electrodo..... | 137 |

| | |
|--|------------|
| VII Aplicaciones a la Compañía HELMERICH AND PAYNE..... | 145 |
| Apanatallamiento..... | 145 |
| Puesta a tierra..... | 155 |

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|----------------------|-----|
| Conclusiones..... | 172 |
| Recomendaciones..... | 175 |

ANEXOS.

- A.
- B.
- C.

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS Y PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN DE “LA COMPANIA HELMERICH AND PAYNE DEL RIG 132”.

I. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN.

El presente estudio esta dirigido estrictamente a la parte de protecciones contra descargas atmosféricas y puestas a tierra de la compañía Helmerich and Payne, misma que tiene altos estándares en seguridad hacia el personal, razón por la cual se hizo necesario e importante realizar el estudio e implementación de sistemas de apantallamiento y puestas a tierra de protección del equipo de perforación para brindar seguridad tanto a los empleados como a los equipos eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones.

Puesto que al no tener adecuadamente el sistema de puesta a tierra puede traer consigo graves problemas a los trabajadores al desconocer las causas y efectos del mismo, al igual que al desconocer el peligro de una descarga atmosférica puede causar varios peligros a todo el equipo y al personal que trabaja.

Por esta razón he decidido realizar este estudio para tratar de mejorar y brindar mejor confiabilidad tanto a los equipos y a las personas y operan y trabajan en el taladro de perforación.

1.2. PRINCIPIOS BÁSICOS.

Durante la construcción de las instalaciones eléctricas, grandes o pequeñas, o el empleo de máquinas o aparatos que van a prestar algún tipo específico de servicio eléctrico, es una norma fundamental de seguridad que todas las partes

metálicas que se encuentren accesibles al contacto con las personas se deben mantener siempre a un potencial bajo similar al de la tierra que es igual a cero para que en caso de accidentes no resulte el peligro para las personas.

Esto quiere decir que las instalaciones eléctricas deben estar diseñadas para prevenir el peligro de cualquier contacto accidental de las partes metálicas circundantes con los elementos que se encuentran bajo tensión, los cuales deben estar provistos de apoyos y aislantes adecuados. Aún con estas medidas de seguridad permanece el peligro de estas partes normalmente aisladas puedan tener contacto con las partes que no están a tensión y tengan un potencial con respecto al suelo (tierra) apareciendo un potencial normal esto puede ocurrir por algunas causa accidental o defectos de aislamientos.

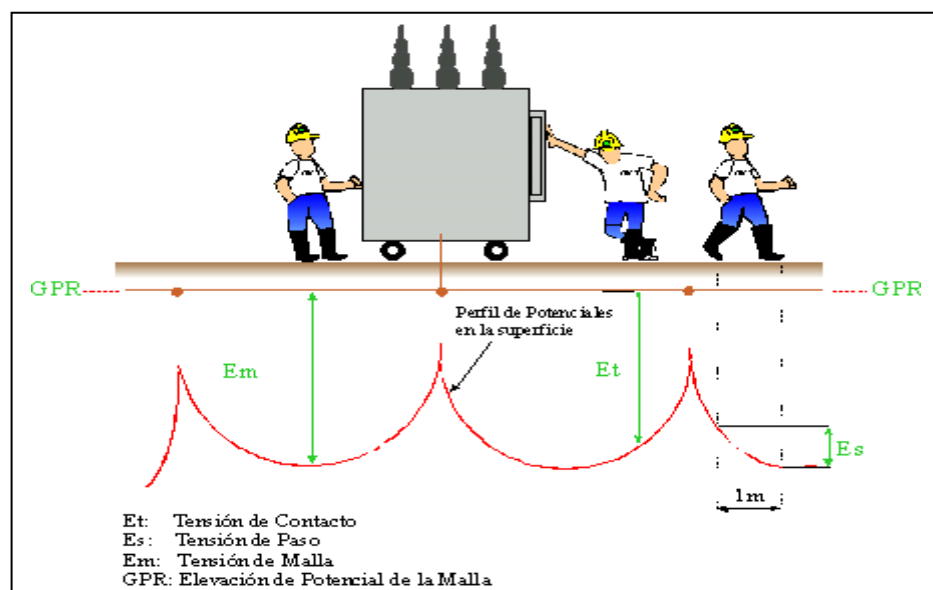


Fig. 1.1 Potenciales a tierra Peligrosos

Este peligro se puede reducir y eventualmente eliminar siendo las partes metálicas que no están a potencial y el suelo se establece una conexión a tierra conveniente que se denomina “conexión a tierra” que se caracteriza por

un valor suficientemente pequeño de R_T como para evitar potenciales que resulten peligrosos.

El valor de resistencia R_T que es necesario tener en la conexión a tierra debe resultar más pequeña a medida que la corriente de falla a tierra I_T resulte más grande, la tensión a tierra resulta entonces de la relación.

$$V_T = R_T \times I_T. \quad (1.1)$$

La resistencia de tierra R_T se da en forma convencional como la relación entre la tensión de tierra en la instalación (media entre una sección inicial A y un punto L suficientemente) lejano a la correspondiente corriente de tierra por dispersor. El punto L que está suficientemente lejano de A, si el dispersor es una varilla la distancia se puede suponer igual a la longitud del mismo. Ver figura 1.2

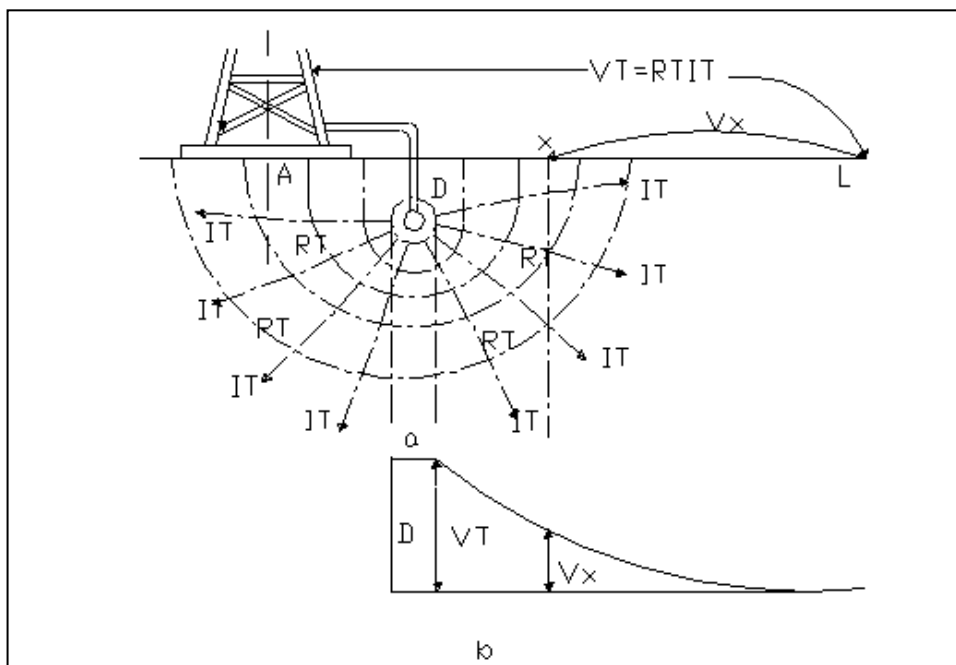


Fig.1.2. Muestra el potencial a tierra en el momento de una falla.

Con la formación de la resistencia de tierra R_T se tiene normalmente una forma limitada, pero bien definida la resistencia propia del conductor de conexión a tierra del cuerpo u objeto metálico y en medición prevalente y variable la resistencia correspondiente a la zona de penetración y difusión de la línea de corriente como del cuerpo metálico D con respecto a la tierra circundante, a partir de la distancia a la cual la expansión de la línea de corriente llega debe haber una sección suficiente grande para que los incrementos de resistencias sean pequeños e irrelevantes.

La variación del potencial eléctrico con respecto a tierra en la zona circundante al punto de puesta a tierra, varía en valor absoluto como el diagrama representado en la fig. b.

Para limitar la tensión resultante V_T correspondiente a la corriente dada I_T a tierra, se debe poner el objeto metálico en ultimo contacto con la tierra por medio de la superficie D suficientemente amplia.

Las características funcionales de una puesta a tierra o red a tierra pueden tener una precisión conveniente ocasionando conjuntamente la tensión de tierra $V_T = R_T \times I_T$ con las tensiones de paso y de contacto que explicaremos en el capítulo 3.

Bajo condiciones de falla el flujo de corriente a tierra, creara un alto gradiente de potencial dentro y alrededor de una subestación como muestra en la figura 1.3, esto para una malla rectangular y un suelo homogéneo.

Amenos que los cálculos correctos estén tomados en el diseño, el máximo gradiente de a lo largo de la superficie de la malla podría ser tan grande, bajo condiciones adversas como poner en peligro a un hombre en ese punto, también la diferencia de potencial peligrosos podría existir a veces, durante

una falla entre la estructura o carcasas de los equipos las cuales están aterrados y cerca de la puesta a tierra.

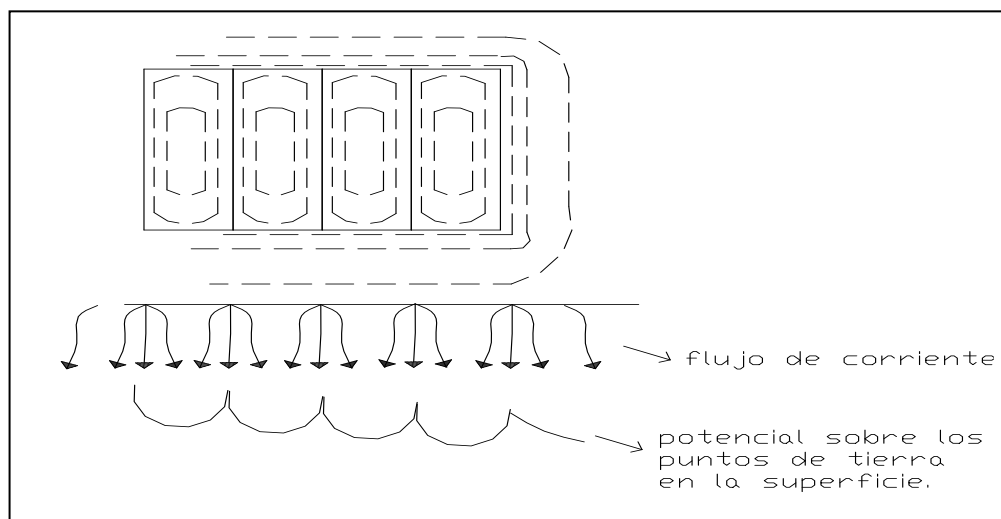


FIG.1.3. corrientes y potenciales alrededor de una malla a tierra.

Estos incrementos de potencial de la red se pueden disminuir realizando una adecuación a la malla de tierra como es: disminuyendo la separación entre conductores del cuadro de la malla de tierra. La malla de tierra ideal sería una placa de cobre enorme que cubra toda la estación, para disminuir los potenciales, pero esto no es posible por cuestiones económicas, medioambientales y de instalación.

Otra forma para disminuir los potenciales peligrosos de la red es aumentando varillas unidas a la malla y clavadas mucho más profundo que la red de tierra, para disminuir estos potenciales que son muy peligrosos para las personas y equipos, que en caso de una falla estos potenciales pueden causar serios problemas incluso causar la muerte de las personas que sufran una descarga de toque o paso que veremos más adelante, las varillas pueden colocarse en las intersecciones de la malla o mejor en la parte laterales de la red ver Fig. 1.4.

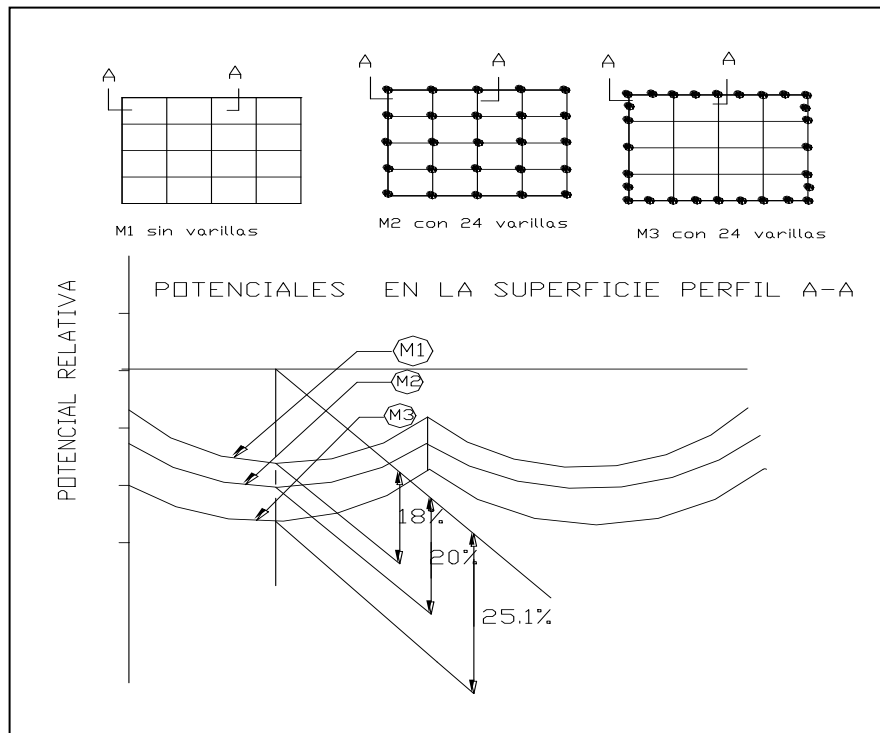


Fig. 1.4 Comparación de potenciales en la superficie con 3 mallas distintas

1.3. ORIGEN Y COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS.

Los rayos se originan por la transferencia (súbita) de la carga eléctrica acumulada en la nube a otra nube o a tierra. En el primer caso se tiene la llamada descarga entre nubes y en el segundo la descarga atmosférica o rayo a tierra. En el presente análisis se referirá únicamente a este último caso.

La acumulación de la carga en las nubes se origina por el roce de estas contra corrientes de aire, generalmente de variadas temperaturas así como por la recolección de cargas existentes en la atmósfera. La distribución más probable de las cargas dentro de la nube consiste en una acumulación de cargas positivas en la parte superior y negativas en la parte inferior. A manera de un condensador en el cual el dieléctrico está constituido por la parte central de la nube. Este denominado “efecto del condensador” se presenta en la parte inferior de la nube y

la tierra, en la cual hay una acumulación de la carga positivas conforme se indican en la fig 1.5

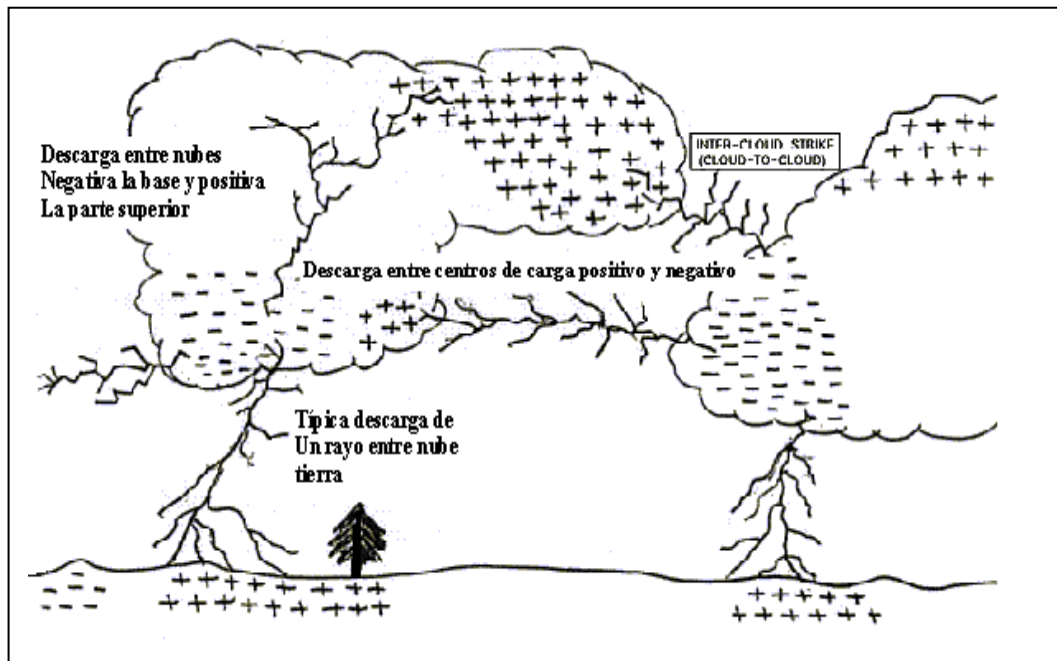


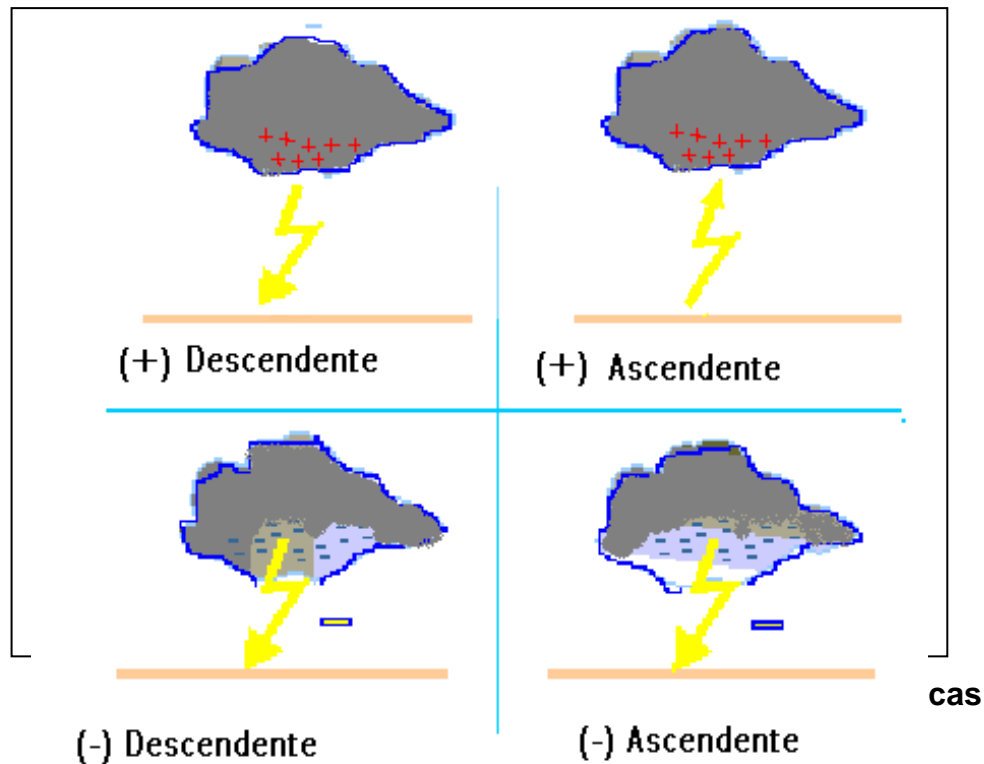
Fig1.5. distribución típica de cargas en las nubes y en la tierra.

Cuando la acumulación de cargas negativas en la nube alcanza valores altos (electro estáticamente críticos), la repulsión entre cargas de igual signo originan un desplazamiento de estas hacia las de signo contrario a través de canales de carga en el aire. En estos canales al tiempo que crecen se despliegan lateralmente en forma aleatoria.

Debido a efectos electroestáticos y el viento, prolongándose unas veces y encontrándose otras.

Relámpago de nube-a-tierra es el más perjudicial y peligroso de los relámpagos, aunque no el tipo más común. La mayoría de las descargas originan cerca del centro de la carga bajo-negativo y entrega carga negativo a Tierra. Sin embargo, una minoría apreciable de las descargas lleva carga positiva a Tierra. Estas descargas positivas a menudo ocurren durante la finalización de la tormenta. Las

descargas positivas también son más comunes en un porcentaje de caídas de rayos a tierra del total durante los meses del invierno



El rayo entre nube tierra es el tipo más común de descarga. Este ocurre entre cargas opuestas dentro de la misma nube. Normalmente el proceso se produce dentro de la nube y parece del exterior de la nube. Sin embargo, la descarga terminaría en el límite de la nube y con un cauce luminoso, similar a un nube-a-tierra.

Los canales desde la nube a tierra se los conoce como canales descendentes, entre ellos, hay una que prevalece sobre los demás acercándose cada vez más a la tierra, a este se lo conoce como líder que a su máximo crecimiento llega hasta unos cientos de metros desde la tierra. No es visible. Pero puede detectarse en el rango del ultravioleta.

Como contraparte a los canales descendentes, desde tierra y es de bastante posterioridad a su aparición, se forman varios canales ascendentes que se

originan en objetos o estructuras altas situados sobre el suelo, tales como árboles, torres, edificios, colinas, etc. Como puede apreciarse en la Fig. 1.7.

La razón para que estos canales ascendentes se originen en estructuras altas se debe a al elevada magnitud del gradiente de potencial por el “efecto de puntas” que explicaremos mas adelante, de las mencionadas estructuras.

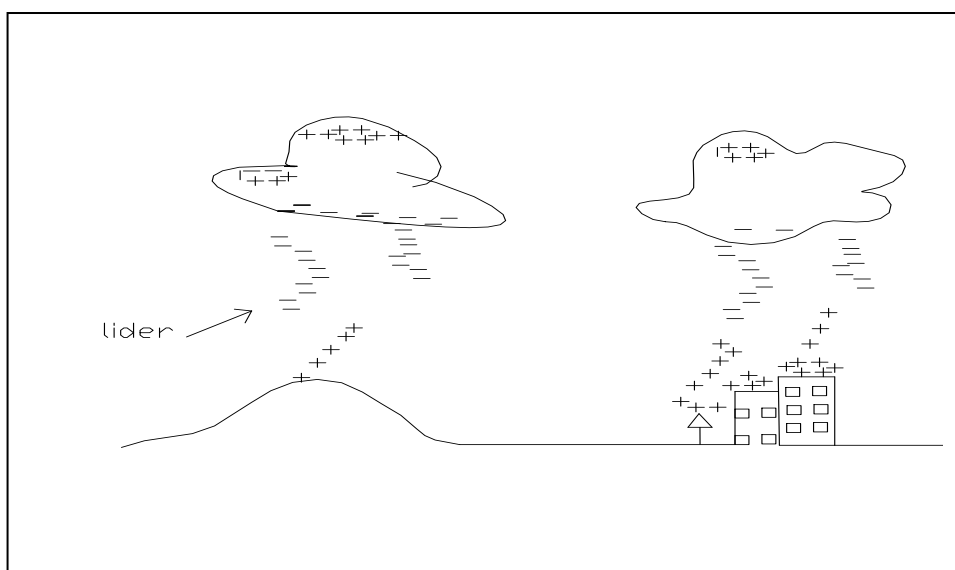


Fig. 1.7. canales descendentes (líder) y ascendente En la nube y a la tierra, respectivamente.

El líder en su descenso actúa básicamente solo impulsado por la repulsión de cargas, hasta que cerca de los 1000 metros sobre el suelo ocurre una fuerte interacción (atracción) con los canales ascendentes. La distancia entre las cargas opuestas continuas acortándose hasta que alcanza la denominada “distancia critica de arqueo” entre el líder y algunos de los varios canales ascendentes, distancia que esta en orden de los 200 metros.

En esta ultima parte del proceso, el contacto entre el líder y uno de los canales ascendentes (canal ascendente de contacto) ocurre en forma probabilística, porque cualquier canal ascendente puede llegar a la distancia critica, la cual una

vez alcanzada y debido a la diferencia de potencial entre las cargas de signo opuesto, da origen al primer contacto entre ellas constituyendo la descarga. El camino seguido por el líder puede sufrir bruscos desvíos hasta contactar con el canal ascendente para luego seguir la trayectoria de éste.

El autor ha observado (a través del destello luminoso del rayo) que la continuación de la trayectoria del líder, al contar con el canal opuesto, en las nubes, cuando el rayo finalmente se descarga en ellas naturalmente el canal ascendente de contacto seguirá el camino trazado por el líder. La unión de las trayectorias del líder y del canal ascendente de contacto constituyen la primera descarga que usualmente es visible, pero ha abierto un camino eléctricamente conductor, cuya explicación se indica a continuación.

El proceso de la primera descarga permite que las cargas de una polaridad, en forma violenta se introduzcan en los canales formados por las cargas del signo opuesto. En estas circunstancias se produce una recombinación parcial de cargas, pero el número de las que permanecen aisladas son mayoritariamente elevado, la coexistencia de cargas de ambos signos en el canal formado por la primera descarga de ambos signos en el canal formado por la primera descarga es un plasma eléctrico y por lo tanto conductor.

La presencia de este conductor entre nube y tierra, que persiste hasta por varios segundos, y el desequilibrio electroestático generado en todo el proceso descrito, hace que las cargas de las otras nubes viajen a tierra a través del canal formado, dando origen a múltiples descargas.

Según se reporta, se ha detectado 6, 12, y hasta 20 descargas sucesivas. De estas descargas, la segunda o tercera son las más brillantes y también las de mayor contenido energético. Las subsiguientes van disminuyendo en energía y frecuencia hasta que finalmente desaparecen, todo este proceso tiene lugar en unos pocos segundos.

1.4. EL PODER DE PUNTAS.

Un objeto conductor electrizado que tenga una forma puntiaguda tiende a concentrar todas sus cargas sean positivas o negativas en las regiones puntiagudas en la figura 1.7 se ilustra este hecho mostrando un bloque metálico con carga eléctrica, la cual como sabemos, se distribuye en su superficie. Pero esta distribución no es uniforme: en P, donde hay una saliente acentuada, hay una gran acumulación de cargas eléctricas que en otras regiones que son casi planas.

Así pues, si aumentamos continuamente la carga eléctrica en el cuerpo la intensidad del campo eléctrico al su alrededor también aumentará gradualmente (al aproximarse una tormenta incrementa el campo eléctrico). Es fácil comprender entonces que en la porción más aguzada (P, figura 1.8), el valor de la rigidez dieléctrica del aire será sobrepasado antes de que esto ocurra en las demás regiones. Por lo tanto, será en las proximidades de la zona puntiaguda donde el aire se volverá conductor (descarga de un rayo), y por consiguiente, será en tal punta donde se escapara la carga del bloque metálico.

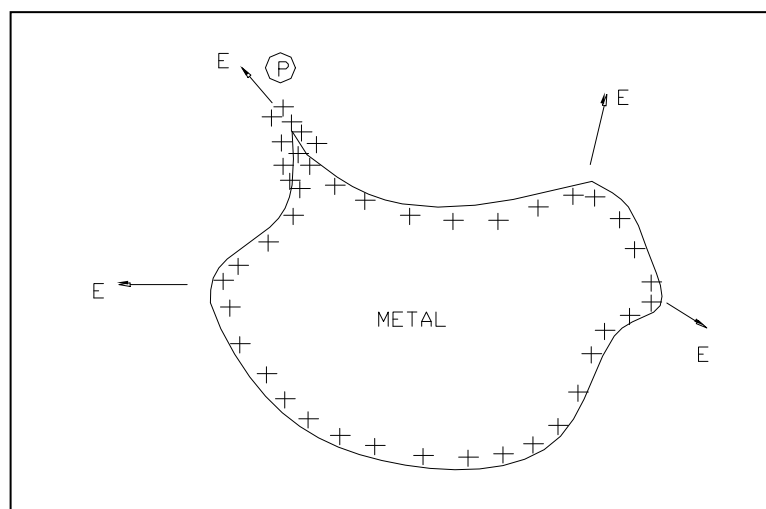


Fig. 1.8 Campo eléctrico en las puntas de un conductor electrizado

Cuando una nube de tormenta, con carga negativa, pasa por un edificio, se induce en el techo de éste cargas positivas. Existen entonces el peligro de que se produzca una descarga entre la nube y el edificio, pero cuando hay una barra metálica encima de éste, las cargas positivas se concentran en el y con ello el campo eléctrico se vuelve muy intenso en las proximidades de la punta; este fenómeno es conocido como fenómeno de “**poder de puntas**”.

Es fácil comprender entonces que en la porción puntiaguda, el valor de la rigidez dieléctrica del aire que es (3×10^6 N/C), del aire será sobrepasado antes de que esto ocurra en las demás regiones. De modo que el aire que esta al su alrededor se ioniza, volviéndose conductor, y haciendo que la descarga eléctrica sea captada y pase a tierra a través de dicha punta.

La corriente de descarga positivas que se forma sobre la punta afilada, constituye una carga espacial o corona, este puede subir hasta la nube por acción del campo eléctrico y del viento, neutralizando así sus cargas negativas, reduciendo la tensión eléctrica formada entre el suelo y la nube a niveles inferiores de potencial para la formación del rayo; de ahí; que el poder de puntas encuentra su aplicación en la construcción de los pararrayos.

1.4.1. CONTROL DE LOS RAYOS.

Como se indico el líder descendente se une con algunos de los canales ascendentes de una manera probabilística, la mayor probabilidad de unión se da con el canal que parte de la estructura u objeto mas elevado sobre la tierra a fin de controlar a los rayos se aprovechan este comportamiento de la descarga, colocando expresamente un objeto conductor (protector) conectado a tierra, en una posición más alta que los elementos protegidos.

1.5. CARACTERÍSTICAS Y EFECTOS DEL RAYO.

El Rayo toma el camino de menor resistencia, que normalmente es la distancia más corta entre la nube y el suelo, tal como un edificio, un árbol, un animal o una persona que permanezca de pie al descubierto o sobre una barca en una laguna, río o en el mar, pueden atraer el rayo. Al impactar el rayo cualquier estructura viaja a través de ella con corrientes muy altas $>10\text{kA}$ hacia la tierra. En su trayecto hacia ella, la corriente del rayo genera peligrosas sobre tensiones (Altos Voltajes) que pueden ocasionar lesiones en seres humanos o animales y daños en equipos eléctricos y electrónicos.

El mayor riesgo recae en la vida de las personas y semovientes. Existen dos tipos de Sobre tensión que pueden afectar a una persona: Tensión de Paso y Tensión de Contacto de malla que explicaremos en el capítulo (3.5).

El rayo es principalmente caracterizado por parámetros relacionados con el arco eléctrico entre la nube y la tierra.

El rayo tiene la capacidad de generar transitorios de corriente y de voltaje elevados de hasta 600 millones de voltios y de 10200 mil amperios. Además es posible tener una secuencia de varios impactos bajo el mismo canal, esto ocurre cuando canales secundarios inmediatos al principal siguen la ruta trazada por éste, se pueden dar 20 descargas provenientes del desarrollo de un solo rayo.

La energía promedio liberado en una descarga es de 55 Kwh. El peligro de la descarga se sitúa en el factor tiempo, ya que, toda la energía se disipa en 100 a 300 microsegundos y la corriente pico de descarga es alcanzado en solo 1 a 2 μs .

Todos los parámetros dificultan el control de los rayos, para ello únicamente se dispone de elementos de atracción y de medios de transporte para conducirlos hacia colectores de tierra a fin de asegurar su disipación en el suelo.

Un impacto del rayo sobre la instalación, causaría destrozos grandes, seguidos muchas veces de incendios. Para estimar los potenciales desarrollados durante una descarga, podemos analizar la siguiente situación. Un equipo con carcasa metálica, sujeto a una descarga directa de un rayo con una corriente (I_d) de 10KA, si la resistencia (R) presentado por la carcasa es de 0.5Ω y que se encuentra con conexión a tierra, por un conductor de resistencia despreciable; de esta forma la tensión en la carcasa del equipo está dada por $\Delta V = I_d \times R = 10000 \times 0.5 = 5 \text{ Kv}$. Esta tensión es suficiente para provocar una destrucción de la instalación, tratándose de personas que eventualmente estuviesen en contacto con la carcasa del equipo, el efecto de la descarga es la muerte instantánea.

Otro efecto causado sobre las instalaciones es cuando un rayo cae cerca de las líneas de transmisión o de señal, el campo magnético radiado por las corrientes del rayo, se acoplan en los conductores e inducen en ellos voltajes transitorios altos. Por ejemplo en una línea de transmisión a 2 millas del lugar del impacto se puede inducir sobre voltajes de 20KV, resultando capaz de dañar equipos electrónicos.

II. APANTALLAMIENTO.

2.1. INTRODUCCIÓN.

Los sistemas eléctricos, maquinarias, herramientas y personal que se encuentran a la intemperie y están permanentemente expuestos a la acción de las descargas atmosféricas y entre ellas a la más común, conocida como Rayo, en este estudio descargas atmosféricas o rayo se los empleara como sinónimos. La protección clásica de una instalación o equipos se debe protegerse en forma semejante a las líneas de transmisión contra las descargas directas e indirectas ya que los pararrayos convencionales sirven para proteger únicamente contra ondas entrantes, por que es necesario apantallar ya sea con mástiles, hilos de guarda para subestaciones eléctricas, y actualmente con elementos electrónicos como son los de ionización, que sirve para las industrias petroquímicas, eléctricas, grandes edificios. En la figura 2.1 se muestra la forma de apantallamiento, o blindaje contra descargas atmosféricas.

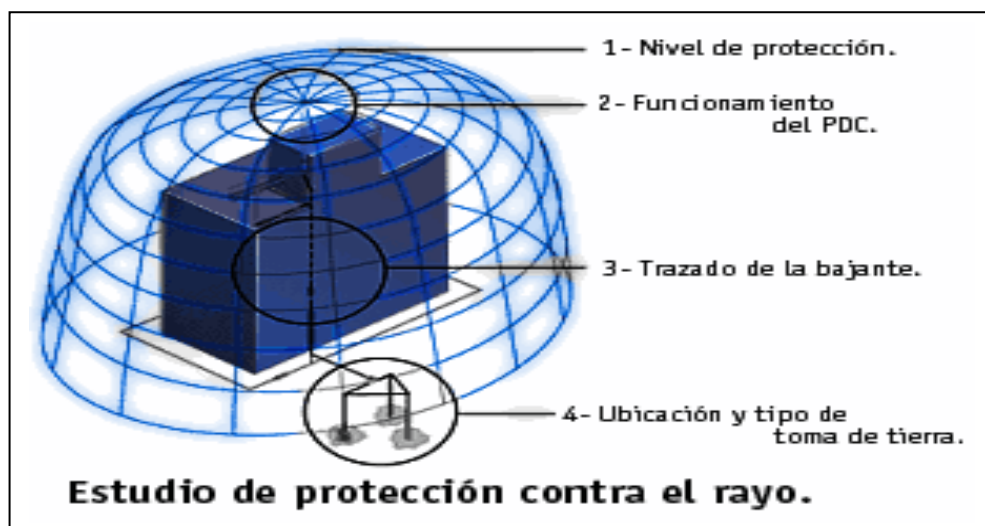


FIG.2.1. forma de apantallamiento contra descargas atmosféricas

Para poder realizar un adecuado apantallamiento es necesario conocer el proceso básico de formación y descarga de los rayos hacia la tierra y luego como interceptarlos y desviarlos a tierra, para que ocasionen daño, constituyéndose este método la filosofía de este tipo particular de protección. El proceso de descarga determina que el punto final de incidencia siga un patrón probabilística, esta característica se la considera al emplear los diferentes métodos de apantallamiento de describiremos luego.

El elemento protector o guardia (mástil, hilo de guarda) tiene entonces por finalidad atraer sobre si la descarga y conducirla a tierra, de la forma que no dañe a los elementos protegido. Este efecto se denomina “apantallamiento o blindaje” y constituye uno de los medios mas utilizados para el control de los rayos.

Esta claro que mientras más alto esté el elemento protector sobre los elementos protegidos, mayor será la probabilidad de intercepción de un rayo, y por lo tanto existirá un mayor grado de protección. Pero por otra parte, subsiste la probabilidad de que el rayo no sea interceptado, esta ocurrencia se denomina “falla del apantallamiento” una elevación extrema de la guardia produce situaciones no aceptables en ingeniería e incrementan excesivamente los costos de la protección, por lo que una cierta probabilidad de falla del apantallamiento debe ser aceptada. Esta probabilidad se la define cuantitativamente, según Link, como el número de años que debe transcurrir para que ocurra una única falla del apantallamiento y que denominaremos “ periodo de protección del blindaje” que es el tiempo en el cual podría haber una probabilidad de una descarga eléctrica en la zona protegida esto veremos más profundamente más adelante.

2.1 1. COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE APANTALLAMIENTO.

Las estaciones eléctricas, telecomunicaciones instaladas a la intemperie, junto con el personal y los equipos, localizados en sus predios son los elementos mas expuestos a un ataque directo del rayo, de tal forma que, para proteger las instalaciones, hay que proveer de elementos y dispositivos para que la descarga se encamine a tierra sin atravesar dichas partes, es decir, ofrecer al rayo un camino mas fácil que cualquier otro.

En las instalaciones, eléctricas, electrónicas y telecomunicaciones, el sistema de protección contra rayos, consta de tres componentes básicos:

- ▶ Elementos protectores o terminales de aire contra descargas atmosféricas directas.

- ▶ Conductores descendentes o cables de conexión entre los elementos de captación y la toma a tierra.

- ▶ Y las tomas de puesta a tierra.

a. EL ELEMENTO PROTECTOR.

El elemento protector debe captar los trazos de las descargas de los rayos de preferencia de las partes vulnerables de la instalación protegida.

Los terminales de aire o captores: Son terminales de aire usados para la protección de las instalaciones contra las descargas eléctricas directas. Este crea una región ionizada al rededor suyo para poder interceptar la descarga del rayo

sobre si y por lo tanto absorbe la corriente de descarga y la encamina hacia la tierra.

El elemento captor debe colocarse en el punto mas alto del lugar que se va a proteger. La acción protectora del dispositivo es una zona incluida dentro de un cono, cuyo vértice esta en la punta del elemento captor y que tiene por base un circulo cuyo radio igual al doble de la altura del elemento captador, este valor no es muy cierto, pues han dado resultados poco satisfactorios, mas adelante haremos un estudio mas detallados de las zonas de protección. Se puede requerir mas de un terminal para los casos de protección de áreas grandes, sin necesidad de elevar demasiado la altura de la estructura. El sistema se conecta a tierra mediante varios colectores (cables de cobre desnudos) distribuidos alrededor del predio que normalmente termina en una toma de tierra.

El tradicional elemento captador, conocido también como varilla de Franklin consiste básicamente de una o varias puntas verticales destinadas a la recepción del rayo. La punta debe ser de material conductor, actualmente se construyen las puntas de los pararrayos empleando tungsteno. El resto del terminal se fabrica de hierro o acero galvanizado, la longitud total del terminal está comprendida entre 0.5 a 2 metros. Y su sección y su sección no deben ser inferiores a 500 mm^2 (12.6 mm) de radio en la base del elemento captador.

Los pararrayos auto válvula o descargadores: son usados para proteger contra las obre tensiones que llegan hasta la estación por la red de energía comercial.

Los daños ocasionados por las tormentas tienen su origen principalmente en las tensiones transitorias que se establecen en las líneas aéreas de distribución eléctricas y/o de señal, ya sea en el caso de una descarga directa sobre la red o de una descarga en la proximidad de la misma, originando sobretensiones que se transmiten a través de las líneas hacia las instalaciones internas.

Los descargadores son dispositivos destinados a derivar a tierra los transitorios producidos por las descargas atmosféricas, es decir, actúa como limitador de sobretensiones obteniendo valores que resulten admisible para las instalaciones de equipos eléctricos. Los lugares mas apropiados para la instalación de los descargadores son los extremos de las líneas largas y también en los puntos de derivación. Estos dispositivos contienen como elemento principal un disco de resistencia calculada a la tensión nominal de servicio, cuyo objetivo es ofrecer una gran resistencia a las corrientes débiles y una muy reducida, a las corrientes elevadas, lo que permiten de una forma segura el paso de corriente entre la línea de energía y tierra, al establecerse una tensión peligrosa originada por un rayo.

b. CONDUCTOR DESENDETE.

El conductor descendente permite transportar las corrientes de descarga a tierra, sin el peligro de una descarga lateral o electrificación del edificio. El termino, descarga lateral, es utilizado para describir la parte de la descarga que se escapa del conductor descendente y salta hacia objetos cercanos.

Para entender el valor técnico del cable, es necesario primeramente revisar los problemas asociados con éste. Todo conductor presenta una impedancia, que da lugar al desarrollo de caídas de tensión elevadas durante una descarga, de valor.

$$\boxed{V = I \cdot R + L \cdot (di / dt)} \quad (2.1)$$

El valor de la inductancia se estima en 1.6 $\mu\text{H/m}$ que es bastante pequeño. Sin embargo

la amplitud de la corriente de descarga aumenta a razón de 10^{10} A/seg; el efecto de la inductancia viene a dominar. Por ejemplo un cable de cobre de 35 mm^2 de sección, de resistencia de $7 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$. Según la tabla (2.1)

Para una probabilidad de descarga del 50% se tiene una corriente pico de 30 KA y una (di/dt) máx. de 25 GA/seg; la caída de voltaje será:

$$V = (30000 \times 0.0007) + (1.6 \times 10^{-6} \times 25 \times 10^9)$$

$$V = 40021 \text{ voltios por metro de conductor descendente.}$$

Esta tensión es elevada, razón por la cual es preferible instalar múltiples conductores paralelos independientes (mínimo dos), alejados lo más posible uno de otro, lo que permite reducir el riesgo de una descarga lateral. De modo similar se utilizan conductores con aislamiento H.V (high voltage), esto disponen de una envoltura exterior que actúa como una protección hacia los objetos cercanos, por lo tanto el peligro de la descarga lateral es virtualmente eliminada y permite incluso en el recorrido del cable empotrarse en las paredes. Los conductores descendentes deben montarse de manera que siga una trayectoria lo más continua, vertical y lo más directa que sea posible, evitando los caminos bruscos de dirección (ángulos rectos) y haciendo que siempre sean descendentes.

Los efectos que ocurren a través de los conductores desnudos durante el proceso de la descarga se indica en la figura 2.2, donde se observa las condiciones eléctricas antes de la descarga y durante la transferencia de las cargas a tierra. Se ve además como la varilla súbitamente alcanza una polaridad opuesta a la del suelo, esto produce un intenso campo eléctrico entre la varilla, el conductor descendente y el edificio. Aquello incrementa el riesgo de una descarga lateral.

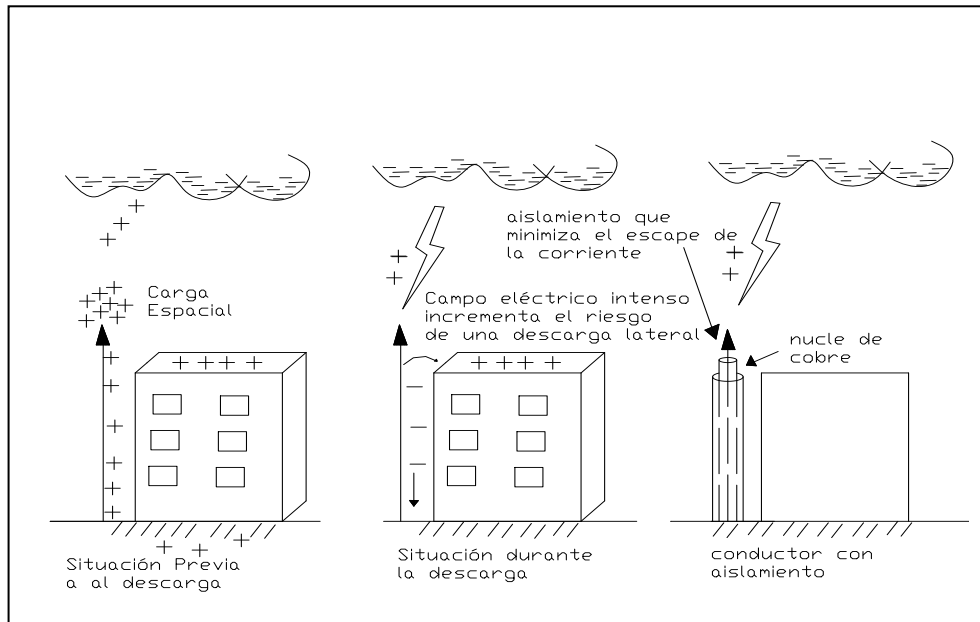


FIG. 2.2 desarrollo de la descarga lateral

El conductor empleado generalmente es de cobre y su sección mínima debe ser de 25 mm^2 ; también se puede usarse aluminio y en este caso su sección mínima ha de ser de 50 mm^2 . En lo que respecta al cable HV o Triax, éste consta de diversas capas de material dieléctrico (aislamiento primario y secundario) el cual crea una capacitancia equilibrada entre el núcleo y su envoltura que asegura un aislamiento total frente a transitorios; su núcleo es de cobre con una sección de por lo menos 50 mm^2 .

C. TOMA DE TIERRA.

Esta parte de la protección contra las descargas es de importancia primordial, ya que una mala tierra hace ineficaz la instalación del sistema del pararrayos. Es indispensable para una dispersión segura de las altas corrientes de descarga. En la práctica se ha demostrado que instalaciones con resistencias de tierras de inferiores a 5Ω representan la menor incidencia de efectos por caídas de rayos.

En determinadas áreas es posible usar varillas e hincarlas a cierta profundidad (mínimo a 1.8 m); debe elegirse para su emplazamiento el lugar más húmedo por ser él mas conductor para conseguir una conexión a tierra eficiente. Para zonas rocosas la toma de tierra tipo superficial de forma radial puesto que en la parte más profunda donde esta colocada la toma de tierra tiene una resistividad muy baja.

El sistema de malla con varillas verticales es la más aconsejable en subestaciones eléctricas, estaciones de telecomunicación, por su geometría permite una mayor reducción de la resistencia de tierra, a través del aumento del área efectiva, disminuyendo las caídas de tensión. Este tipo de malla ofrece una mayor protección al operador en casos de descargas.

En la figura 2.3 se muestra un sistema de aterrizaje típico de una subestación eléctrica, y de telecomunicaciones; la malla de tierra debe ocupar todo el área disponible de la zona de la estación.

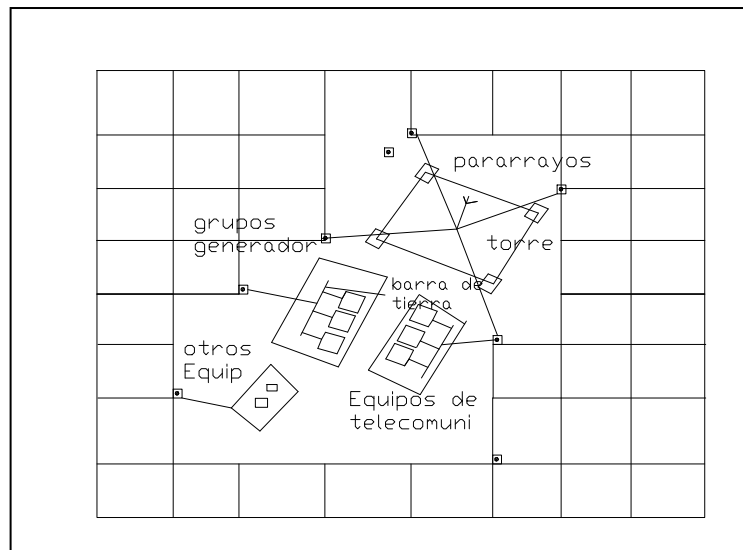


FIG. 2.3 Conductor de bajada del pararrayos conectados a la malla a tierra.

2.2. TIPOS DE APANTALLAMIENTO.

La zona por proteger contra las descargas atmosféricas debe incluir todas las estructuras y equipos en general a ser protegidos.

Existen Tres elementos para el apantallamiento.

1. Hilos de Guarda.
2. Mástil o Bayoneta.
3. Elementos de ionización

2.2.1. APANTALLAMIENTO CON HILOS DE GUARDA.

Los hilos de guarda son utilizados con mayor frecuencia para apantallamiento de subestaciones eléctricas y líneas de transmisión. Los hilos de guarda también se los conoce en algunos países como cables de tierra, generalmente son de acero y se instalan encima de los conectores y conductores de fase. Los datos necesarios para el cálculo de la altura a la cual van a estar apoyados los cables de guarda son como se muestra en la figura.2.4.

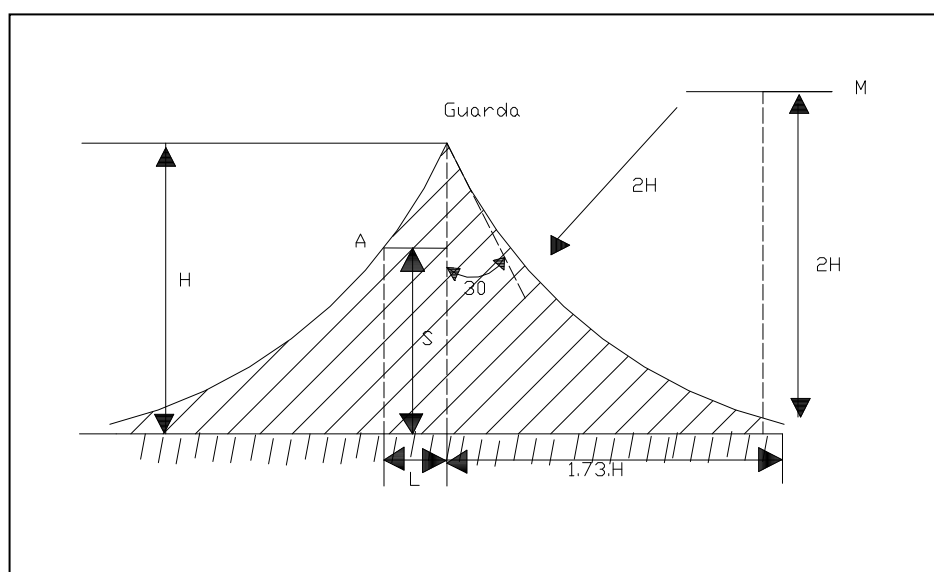


FIG. 2.4. Apantallamiento con un cable de guarda

Donde:

H = Altura del hilo de guarda.

M = Centro de la carga.

G = Hilo de guarda.

L = distancia de un objeto a la posición del hilo de guarda.

Si se emplean dos hilos de guarda el esquema de protección toma la forma siguiente.

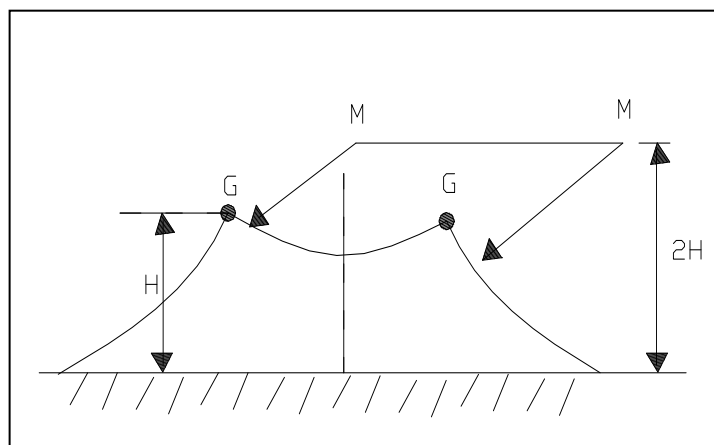


FIG.2.5. protección con dos hilos de guarda.

Para determinar la máxima altura protegida es función de la altura del objeto por proteger y la distancia a la torre del hilo de guarda.

$$H = f (L. S).$$

$$H = (1/3) \times [(2S + 3L) + (1/3) \cdot \sqrt{(S^2 + 4 \cdot \sqrt{(3 \cdot L \cdot S)})}] \quad (2.2).$$

El método de calculo mencionado anteriormente está basado en la protección de los equipos principales de la subestación contra descargas directas por rayo y las expresiones matemáticas indicadas para él calculo de la altura a la que deben de

estar los hilos de guarda se obtienen a partir de un modelo electromagnético de blindaje en las subestaciones eléctricas.

Los hilos de guarda se instalan directamente sobre las estructuras por lo general son de acero galvanizado con una sección no inferior a 500 mm^2 usándose conectores para unirlos a la estructura se conectan a tierra por lo menos en dos puntos con cable de acero galvanizado también con una sección no inferior a 500 mm^2 . La distancia de protección horizontal de los conductores de guarda, se los llama “**distancia protegida**” esta y su altura efectiva definen el ángulo de apantallamiento, y por lo tanto el ángulo de apantallamiento correspondiente considera además la magnitud de la corriente del rayo y su distribución estadística.

2.2.2. APANTALLAMIENTO CON MASTILES.

Los mástiles o bayonetas con electrodos de acero cuya función principal es la concentración de los electrones de predescarga para su descarga a tierra a través de la puesta a tierra del sistema, deben estar terminadas en punta y se deben instalar en los puntos más altos de las estructuras del sistema.

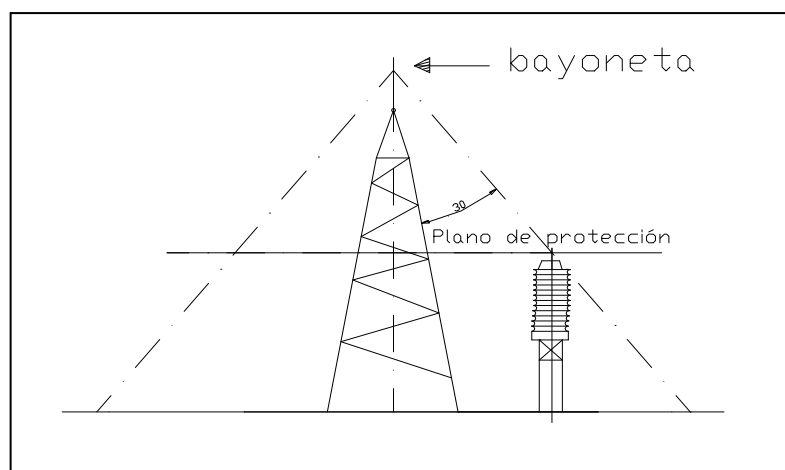


FIG. 2.6. Apantallamiento con Mástil.

La zona de protección que brinda la bayoneta se calcula a través de las zonas de protección que veremos más adelante.

2.3. PROCESO DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

El proceso de la descarga se describe como sigue: se tiene una conducción descendente de carga negativa que avanza desde la nube hacia tierra a través de una secuencia de pasos de canal de 50 a 80m. de longitud, con velocidades de 10^5 m/s transportando una cierta cantidad de carga. Como los pasos de canal avanza hacia abajo se produce un aumento rápido del campo eléctrico sobre el suelo de preferencia en los objetos puntiagudos localizadas a gran altura (poder de puntas). Cuando el campo eléctrico alcanza un valor crítico ver figura (2.7), determinados puntos sobre el suelo origina el lanzamiento de flujos de corriente ascendente de carga positiva, tal que, el primer punto que intercepte la punta del paso del canal más cercano (canal principal o líder) completa el camino de ionización entre la nube y tierra.

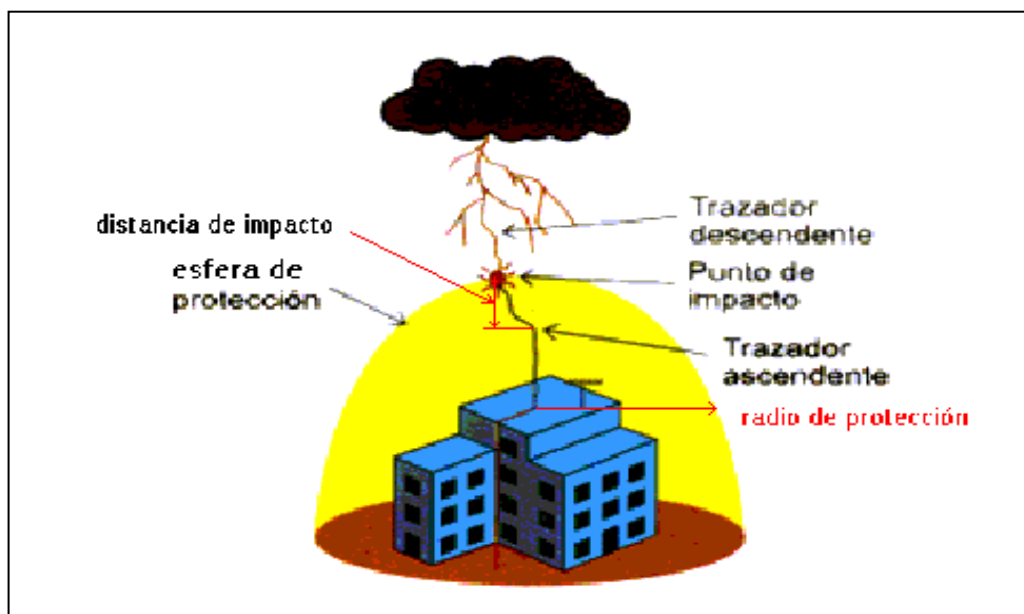


Fig 2.7. Proceso de una Descarga Atmosférica

La longitud mínima del flujo ascendente para conectar con el canal descendente se denomina **distancia de impacto (Di)**, **distancia crítica de arqueo (Rs)** o **radio de atracción (R)** de acuerdo al método a utilizar. Una vez completado el canal o retorno de impacto, este permite la circulación de la corriente.

Cabe indicar que el proceso de unión, Flujo / canal se realiza en forma probabilística, ya que cualquier flujo puede llegar a alcanzar la distancia de impacto. Este principio constituye la base del modelo electro geométrico.

La figura 2.8.a. muestra la relación entre la longitud del flujo ascendente y el pico de la corriente de descarga posterior.

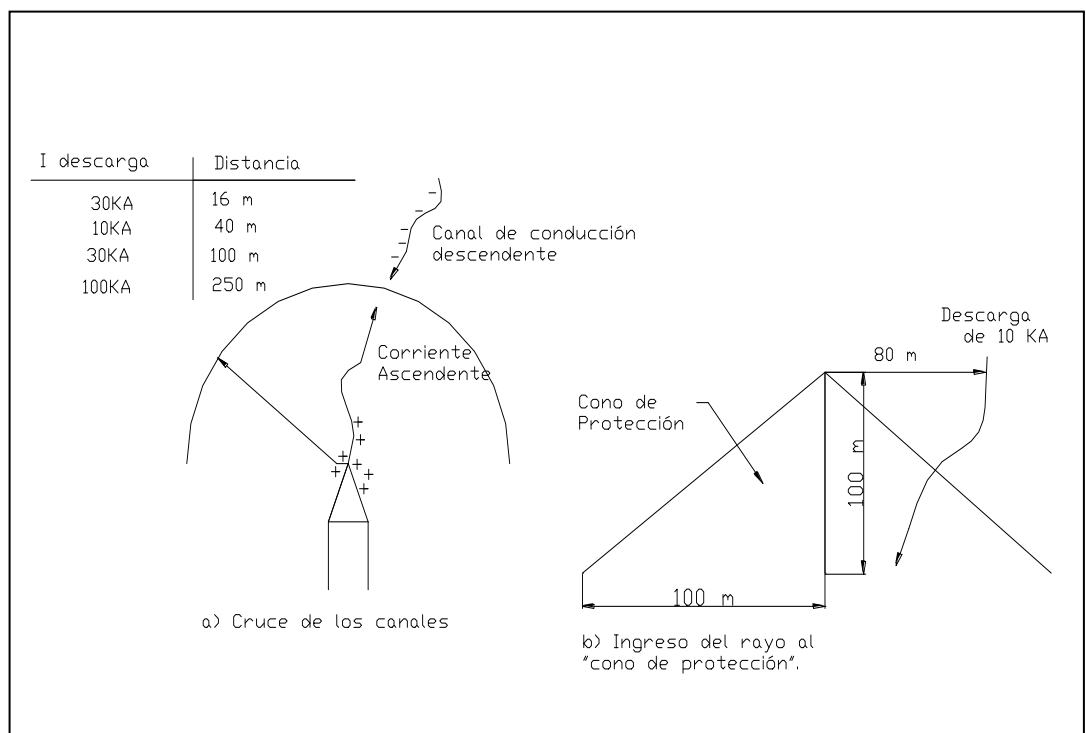


Fig. 2.8. Concepto de zona de Protección

Por ejemplo, Una descarga de 10 KA permite generar un flujo ascendente desde un punto del suelo, si alguno de los pasos del canal descendente alcanza o se aproxima a los 40 m. Más allá de esta distancia el canal avanza

hacia abajo hasta alcanzar un flujo producido en algún otro punto del suelo. Esto se observa en la figura 2.8b donde el rayo ingresa al cono de protección de una estructura alta debido a la incapacidad de emprender un flujo ascendente desde la cima de la estructura.

Una forma de determinar **Di** (distancia de impacto) es por medio de la curva recomendada por Golde que se muestra en la figura 2.9, donde relaciona la longitud del camino y la corriente pico subsiguiente a la descarga tanto para impulsos de rayos negativos como para impulsos de rayos positivos los cuales son menos frecuentes.

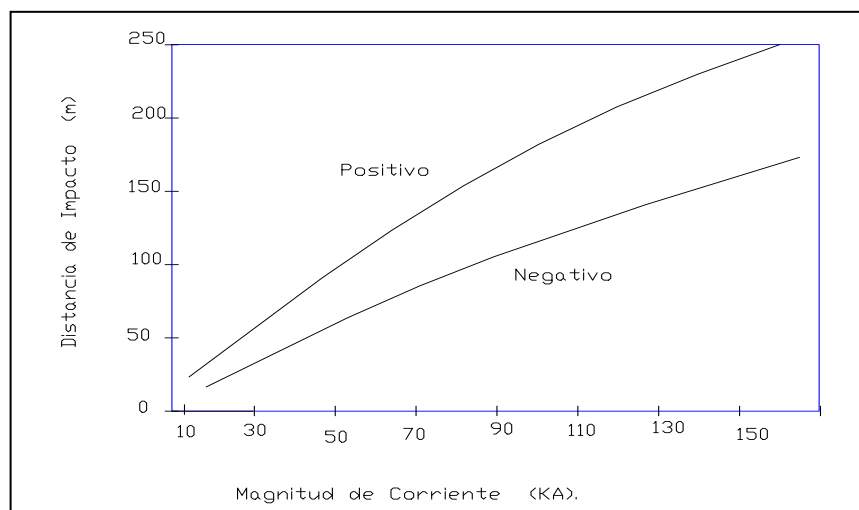


Fig. 2.9 Di en función de la magnitud de corriente del rayo

Por los campos estudiados se indica que hay un grado de correlación entre la carga del canal de conducción y la corriente pico posterior a la descarga. Una relación empírica está dada por:

$$I = 10.6 \times Q^{0.7}. \quad (2.3)$$

Donde:

I es la corriente medida en KA

Q carga en culombios.

Esta relación puede ser usada para determinar la distancia de impacto entre el canal líder y el flujo ascendente, al aplicar las siguientes expresiones empíricas, desarrolladas por científicos dedicados a esta rama como son Link, Eriksson.

$$\text{Link} \quad R_s = 7.1 \times I^{0.75} \quad (2.4)$$

$$\text{Eriksson:} \quad D_i = 10 \times I^{0.65}. \quad (2.5)$$

$$\text{O bien} \quad D_i = 6.7 \times I^{0.8} \quad (2.6)$$

Siendo: D_i = es la distancia de impacto en metros.

R_s = Es la distancia crítica de arqueo en metros.

2.3.1. ESTADÍSTICAS DE PROBABILIDAD DE DESCARGA.

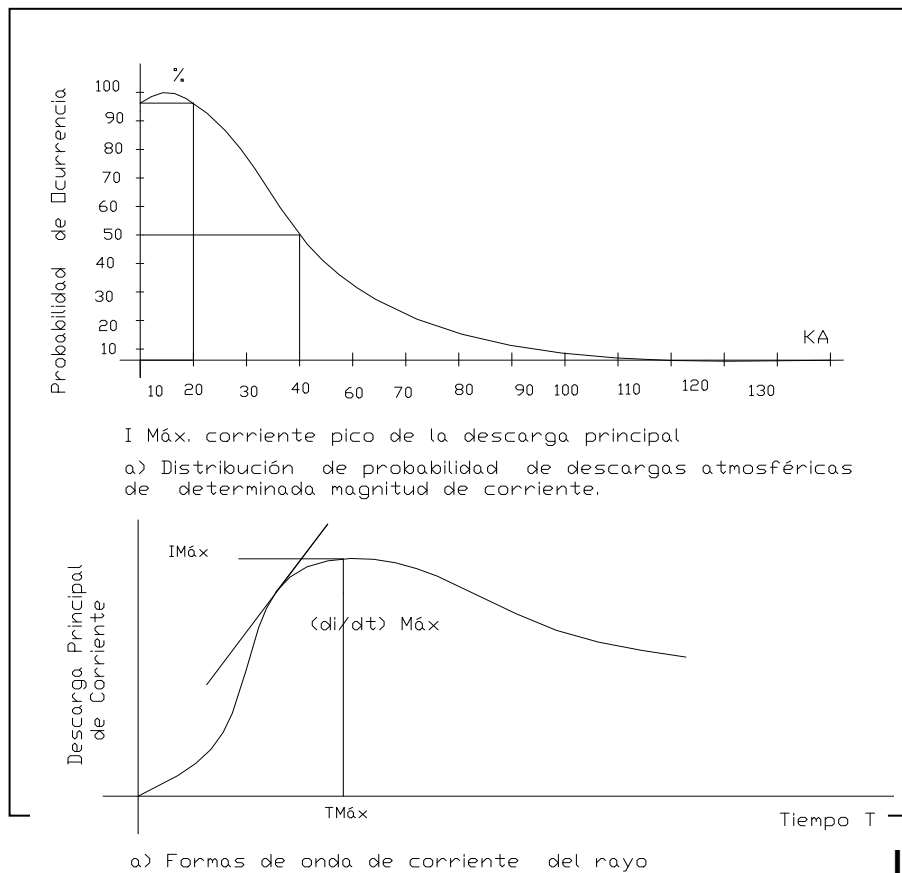
Cabe mencionar que la corriente de descarga es un parámetro cuyos valores de intensidad son de carácter probabilística, son más probables las corrientes de descargas relativamente débiles y menos probables las de gran intensidad.

La norma AS 1768 – 1983 (tablas 2.1) reúne una serie de valores relacionados con la distribución estadística de los parámetros de las descargas atmosféricas, cuyos datos provienen de las investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo.

| Características de Las unidades | Probabilidad de descarga % | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | 99 | 90 | 75 | 50 | 25 | 10 | 1 |
| Descargas | | | | | | | |
| Número de las descargas | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 12 |
| Corriente máxima de la KA | 5 | 12 | 20 | 30 | 50 | 80 | 130 |
| 1ra descarga. | | | | | | | |
| Duración de la descarga | 50 | 100 | 250 | 400 | 600 | 900 | |
| 1500 ms | | | | | | | |
| (Impulso) | | | | | | | |
| Carga total conducida | 1 | 3 | 6 | 15 | 40 | 70 | 200 |
| C | | | | | | | |
| Velocidad del primer rayo | 6 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 70 |
| GA/s | | | | | | | |
| (di / dt) máx. | | | | | | | |
| Energía probable de | 10 ² | 3x10 ² | 10 ³ | 5x10 ⁴ | 3x10 ⁴ | 10 ⁵ | 5x10 ⁵ |
| A ² .s | | | | | | | |
| Impulso ∫i ² .dt | | | | | | | |

Tabla 2.1. Valores Características de las descargas

Con referencia a la intensidad de la corriente de descarga I la figura 2.10. recoge la curva de probabilidad de ocurrencia de descarga de una denominada intensidad y la forma típica de onda de la corriente del rayo según la recomendación AS1 1768, pero este I es un valor de corriente referencial, ya que puede variar dependiendo de las propiedades topográficas de la región observada e incluso por la altitud de la zona



Como se ve todos los parámetros de la descarga eléctrica tiene una distribución estadística. En la práctica, se debe proteger contra las descargas que se registran en el centro de la tabla de distribución por ser las más frecuentes, mientras que las descargas de los extremos de la distribución presentan mayores dificultades de predecir debido a que los datos estadísticos son escasos y por lo tanto son menos exactos. Al elegir el nivel estadístico de protección de este debe ser realizado con límites claramente establecidas mediante las “ventanas” de ocurrencia de descarga, junto al valor de bloqueo inferior estimado (generalmente es el orden de los 10KA).

2.3.2. CORRIENTES DEL RAYO A TIERRA.

En los extremos del canal principal de descarga (Líder), que se aproxima a los objetos en la tierra, es influenciado por la carga del canal y por lo tanto por la magnitud de la corriente probable de la onda de retorno. En consecuencia la posibilidad de una falla de blindaje también depende de la amplitud de la corriente del rayo. La probabilidad de que la corriente alcance un cierto valor puede expresarse, en forma de una distribución estadística.

La distribución de magnitudes que se presenta en la figura 2.11, se derivó de rayos a estructuras altas.

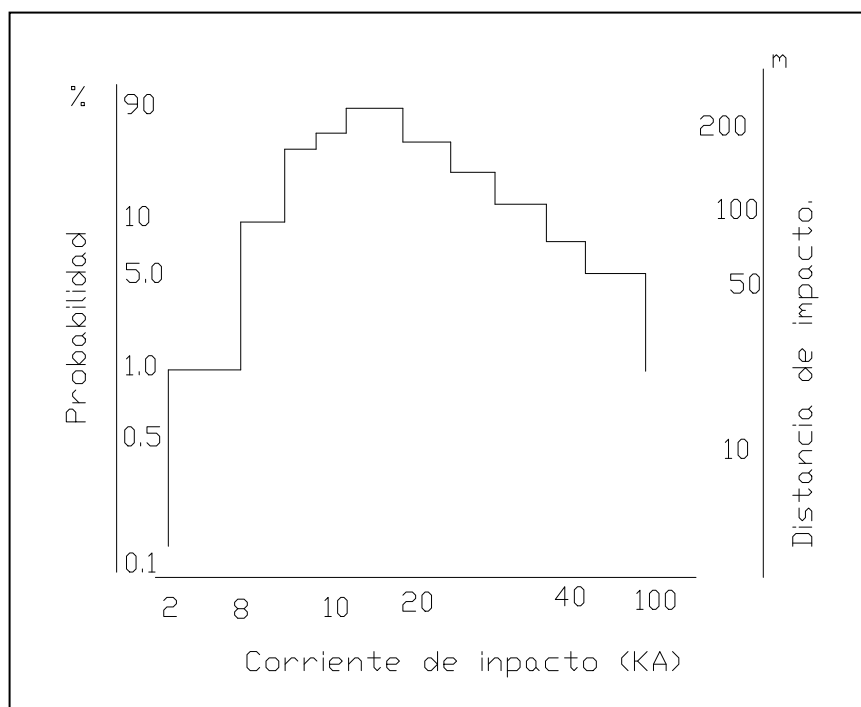


FIG. 2.11. Características de los rayos a tierra según H Linck.

La distancia crítica de atracción del rayo está relacionada con la carga del canal y es por lo tanto función de la magnitud de la corriente esperada. La relación matemática entre estos dos factores (distancia Corriente) es objeto de análisis permanente, los valores de la figura (2.11) son resultados experimentales.

La observación muestra que muchos rayos que se dirigen a tierra no siguen un camino estrictamente vertical. Algunos estudios han demostrado que para el diseño de estaciones o subestaciones grandes el efecto del ángulo, en el largo plazo, es de orden secundario. Por este motivo, en el presente método de apantallamiento de estaciones, se asume la incidencia de rayos verticales solamente. Como podemos apreciar en la figura 4.2 la descarga de rayos entre nube tierra el mismo que se dirige hacia la estructura de un edificio, torres, departamentos dentro de una ciudad.



Fig. 2.12. Descarga de rayos Verticales entre Nube- Tierra

La probabilidad de descarga establece una relación entre las magnitudes de corrientes probables (I_1, I_2, \dots, I_n), distancias críticas o impactos (D_1, D_2, \dots, D_n) y probabilidades de ocurrencia (P_1, P_2, \dots, P_n), donde parte de ellas han de ser los extremos de la distribución estadística. Por esta razón la probabilidad existente fuera de la ventana de protección debe ser estimada.

Además la probabilidad de que una estructura reciba una descarga es algo complejo de evaluar, esto depende de las propiedades físicas-geográficas de la

región, del proceso físico de formación, geométrica de la estructura, etc. Una breve descripción de un posible método para estimar la probabilidad de incidencia de descargas que presentan a continuación.

2.3.3. EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE LA INCIDENCIA DE DESCARGA O RIESGO DE EXPOSICIÓN EN UNA INSTALACIÓN

En la actualidad la probabilidad de incidencia de las descargas atmosféricas se registra por medio de dos métodos.

a). Nivel Isoceráunico (N_{ISO}) el cual nos indica el número de días de tormenta por año que se puede dar en una determinada zona geográfica. Este método utiliza los servicios meteorológicos, los mismos que disponen de mapas isoceráunicos. Si bien estos mapas pueden ser una guía, que debe ser usados con la debida precaución, pues allí no indica el número de descargas de rayos que puede ocurrir en días de tormenta. En zonas templadas el nivel isoceráunico oscila del 1 al 100 y en zonas tropicales puede alcanzar los 260, por consiguiente cuanto más alto sea el mismo, mayor será la posibilidad de caída del rayo.

La probabilidad máxima de un día de tormenta es: $N_{ISO} / 365$. **(4.1)**

b). Densidad de descargas a tierra (D_{GFD}) expresa el número de descargas a tierra que se espera por Km^2 , por año. Este método es el más confiable y adecuado para determinar la probabilidad de riesgo de la caída del rayo en una instalación pero tales cálculos deben ser vistos con cautela. Los valores típicos de GFD que se han obtenido para áreas geográficas con una actividad moderada poseen un valor de GFD entre 1 y 3 por km^2 , por año. En cambio para áreas con actividad baja de descargas el GFD es alrededor de 0.3 a 0.5 y entre 7 a 15 para zonas con alta actividad de descargas.

La tabla 2.2 contiene un resumen de los valores GFD aproximados alrededor del mundo en donde se relaciona con el nivel isoceráunico por año.

| ISO | GFD | | Por año |
|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| Columna 1 | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
| Nivel Isoceráunico | Lim. Infer Universal | Lim. Super Universal | Promedio Universal |
| 5 | 0.1 | 1.2 | 0.4 |
| 7 | 0.2 | 1.7 | 0.6 |
| 10 | 0.3 | 2.3 | 0.8 |
| 15 | 0.4 | 4 | 1.3 |
| 20 | 0.7 | 5 | 1.9 |
| 30 | 1.1 | 6 | 2.6 |
| 40 | 1.7 | 8 | 3.7 |
| 50 | 2.3 | 10 | 4.8 |
| 70 | 3.8 | 15 | 7.5 |
| 100 | 6 | 20 | 12.5 |
| 120 | 8 | 25 | 14.5 |
| 140 | 9.6 | 29 | 17.2 |
| Resultados para: | Australia | USA y Europa | Uso general |

Tabla 2.2. Valores ISO y FGD

Si se desea un valor más exacto de la densidad de rayos se puede calcular mediante la ecuación (2.7)

$$D_{GFD} = 0.04 \times Td^{1.25}. \quad (2.7)$$

Donde: D_{GFD} densidad de rayos a tierra por Km^2 por año.

Td Número de días tormentosos por año

Sobre la base de la tabla 2.2 y al área de captura de la estación, se puede estimar la probabilidad del número de descargas de rayos por año sobre un área:

$$P = CA \times 10^{-6} \times D_{GFD} \text{ por año} \quad (2.8)$$

Siendo:

CA = es el área de captura de la estructura en m².

D_{GFD} = es la densidad de descargas a tierra por kilómetro cuadrado, por año.

El periodo de regreso (R) es el inverso de la probabilidad y nos predice el número promedio de años entre el cual se recibe una sola descarga.

$$R = 1/P \text{ años} \quad (2.9)$$

Por otra parte, para determinar los niveles de protección contra descargas atmosféricas directas se las presenta en la tabla 2.3

| Nivel de protección | Pico de Corriente | Probabilidad máxima de protección |
|----------------------------|--------------------------|--|
| Muy alta | 3 KA - 180 KA. | 99%. |
| Alta. | 6 KA - 150 KA. | 98%. |
| Estándar. | 10 KA - 130 KA. | 93%. |
| Media. | 15 KA - 130 KA. | 85%. |
| Baja. | 20 KA - 130 KA. | 75%. |

Tabla 2.3 Ventanas de protección típicas

La columna 3 puede interpretarse como el porcentaje de descargas que inciden sobre la instalación y son interceptados por el sistema de apantallamiento. Vemos pues, que se establecen una correlación con el “periodo de riesgo de

falla del sistema de protección” definido por Linck, generalmente la corriente que se asume en general para el diseño de apantallamiento está en el orden de los 10 a 20 KA.

2.3.4. PERIODO DE LA PROTECCIÓN DEL BLINDAJE (Y).

Este periodo de protección del apantallamiento debe determinarse tomando como base la importancia de la instalación a proteger, en sistemas eléctricos de potencia puede tomarse como base la vida útil de la instalación, una estación por ejemplo, y este lapso multiplicado por un factor de seguridad (que puede oscilar en estos casos entre 2 o 3) constituirán el periodo de protección del apantallamiento, parámetro que constituirá la base del diseño del sistema de blindaje por el método de Link.

Estudios sobre protección de líneas de transmisión revelan que el método convencional, basado en un ángulo de protección, tiene limitaciones de efectividad tanto para líneas como para estaciones debido a que la correlación ángulo de protección-exposición no ha sido convencionalmente definida.

La técnica aquí descrita esta originalmente diseñada para estaciones o subestaciones grandes y de alto requerimientos de confiabilidad, pero puede hacerse extensiva a otras instalaciones, como líneas de transmisión, edificios, industrias petroquímicas y de telecomunicaciones, etc. La efectividad de un diseño, para protecciones de una estación contra descargas atmosféricas directas, depende del grado de apantallamiento aéreo del área de la estación, contra esas descargas.

El método de LINCK permite una estimación razonablemente precisa del verdadero periodo de protección del blindaje en estaciones, donde una sobre tensión es indeseable. Por otra parte, el método permite diseñar estaciones de alta seguridad con el grado de confiabilidad suficiente.

La probabilidad que un rayo cause una falla de blindaje puede determinarse de varias maneras, el presente método, como se indicó emplea el periodo de protección del blindaje que significa el “número años en los cuales se predice una sola falla del blindaje, parámetro muy práctico y que proporciona una medida más real del riesgo de falla del blindaje, posee un mayor significado frente al llamado “grado de exposición” que emplea los métodos convencionales de diseño.

Si se adopta un valor constante para todas las estaciones, por ejemplo, $Y = 100$ años. Debemos tener presente que para cumplir este requisito, las estaciones más grandes requieren un blindaje más efectivo que las pequeñas. En otras palabras el ángulo de blindaje debe reducirse conforme se incrementa el área de la estación (asumiendo que otros factores no cambien mayormente).

El periodo de protección del blindaje, que luego será empleado para el diseño del apantallamiento, ha sido procesado y se lo presenta en forma de gráfico, para un solo mástil vertical, en la figura 2.13 respectivamente. En ambos casos para cualquier densidad de las descargas a tierra, con el número de fallas de blindaje directamente proporcional a la densidad de descargas a tierra, el periodo de protección es inversamente proporcional al nivel cerámico.

La calidad del apantallamiento debe ser congruente con la confiabilidad del sistema de potencia total, considerando un balance económico entre el costo del esquema de protección y las pérdidas probables resultantes de las fallas de aquel. El periodo de protección del blindaje adoptado debe responder a las consideraciones indicadas

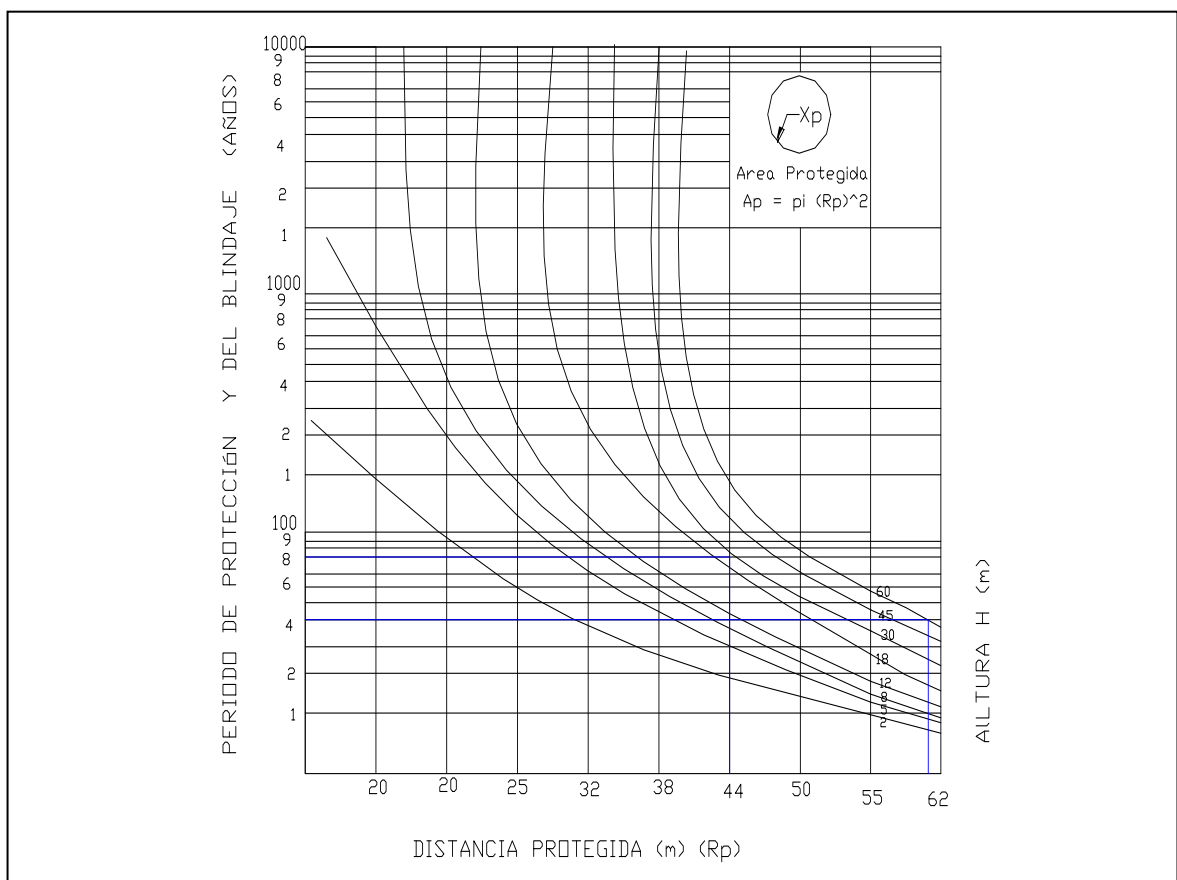


Fig. 2.13. Curvas de periodos de protección para un mástil.

Para evaluar la probabilidad de riesgo de exposición se tienen en cuenta las siguientes consideraciones.

- ▶ El área es de forma rectangular por facilidad de calculo.
- ▶ Se va a considerar que los equipos de la Compañía de perforación se encuentran aisladas puesto que solo existe árboles y monte no existe ninguna edificación o cualquier otra edificación.
- ▶ Los valores el radio de atracción son datos estadísticos tomados de la tabla 4.3.

Para evaluar el periodo de protección del blindaje podemos calcular con la siguiente ecuación.

$$Y'' = Y \cdot (3.7 / D_{GFD}) = Y \cdot (40 / N_{ISO}). \quad (2.10)$$

Donde: Y'' periodo de protección real corregido.

Y periodo de protección tomando como base (100 años).

D_{GFD} densidad de descarga a tierra por kilómetro cuadrado, por año.

N_{ISO} nivel isocerámico de descarga por año.

40 Es el N_{ISO} que se toma como base.

3.7 Es el D_{GFD} que se toma como base

2.4. ZONAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Un factor importante para determinar la ubicación del terminal de aire es el concepto de zona de protección contra rayos. Generalmente, se asume que la zona de protección es cónica o cilíndrica, la base del cono o cilindro es un círculo, cuyo radio depende de la altura del elemento captor, y las experiencias observadas. Esta propiedad indica que las descargas del rayo que debieran ocurrir dentro del área protegida, son "atraídas" hacia el pararrayos.

A través del tiempo se ha ido modificando las zonas de protección en principio el radio de la base era igual, en ediciones posteriores se redujo a $1.75 \times h$ (altura a la cual esta colocada el elemento de protección) debido a informes insatisfactorios, posteriormente se adoptó la relación $r = 1.5 h$, pero siempre no ha de ser confiable.

"Principio de la distancia corta", evaluado por Walter asume que el rayo sale de la base de la nube y "busca" un punto exterior lo más cercano a la superficie de la tierra (pero esto no es tan cierto). De acuerdo a estas consideraciones la expresión encontrada para el radio es:

$$r = \sqrt{2.H - h}. \quad (2.10)$$

siendo: H es la distancia entre la base de la nube y el suelo (200-4000 metros).

h altura del pararrayos.

r Radio de protección.

La solución mas aproximada y la que se utiliza actualmente para la determinación y cálculo de la zona de protección es sobre la base del modelo electrogeométrico que toma en cuenta el proceso de la descarga a tierra. Este concepto, se aplica en los denominados métodos de Golde H, Link H. Erisson, mismos que se detallan mas adelante. De acuerdo al modelo electro geométrico se puede determinar la incidencia de descargas en una estructura en base a la zona de atracción de captura, cuyo concepto depende de los radios de atracción o de captura, cuyo concepto depende de los radios de atracción natural en la estructura. Los mismos se determinan mediante la integral de la frecuencia de distribución estadística y según un modelo computacional. De acuerdo a la expresión siguiente de simulación:

$$R_n = \int \{F[Q(p), C, A, E, V, H, K, G, T] \cdot [L_p]\} dp \quad (2.11)$$

Siendo:

R_n = Radio promedio de atracción natural de la estructura.

$L(p)$ = Distribución de probabilidad natural de intensidad de descarga del rayo (similar al de la figura (2.10))

$F[Q(p), C, A, E, V, H, K, G, T]$ = Define la distancia de los radios por análisis computacional a través de un conjunto de datos de entrada.

C = altura de la carga nube – tierra, generalmente es 3000 m.

A = Altitud del lugar.

E = Voltaje de ruptura del aire, se considera como valor típico 3.1MV/m.

V = Relación de la velocidad de conducción descendente / ascendente. Por experimentos de campos y observaciones fotográficas, normalmente varía entre 0.9 y 1.1.

H = Altura de la estructura.

K = Características de la intensificación del campo. Un K típico esta entre 6 y 20 en las esquinas y de 1 a 5 en paredes.

G = Factor de representación de la forma geométrica de la estructura, generalmente es 1.

T = Factor de la representación física del suelo e incluye la influencia de estructuras cercanas, valor típico 1.

La zona de captura (CA) de una estructura se define como el área limite de ingreso de la punta del canal principal para producir el lanzamiento de flujo ascendente desde la estructura, como se muestra en la figura 2.14 se lo aplica principalmente en todas las esquinas o bordes de la estructura, puesto que son los puntos más probables a producir radios de atracción. En áreas típicas la evaluación del CA es por medio de las siguientes expresiones:

Para una estructura rectangular $CA = (L + 2.Rn) \cdot (A + 2.Rn)$ (2.12)

Para una estructura circular $CA = \pi \cdot (Ra + Rn)^2$ (2.13)

Donde:

Rn es la probabilidad promedio de los radios de atracción.

L y A dimensiones de la estructura rectangular.

Ra radio de la estructura circular.

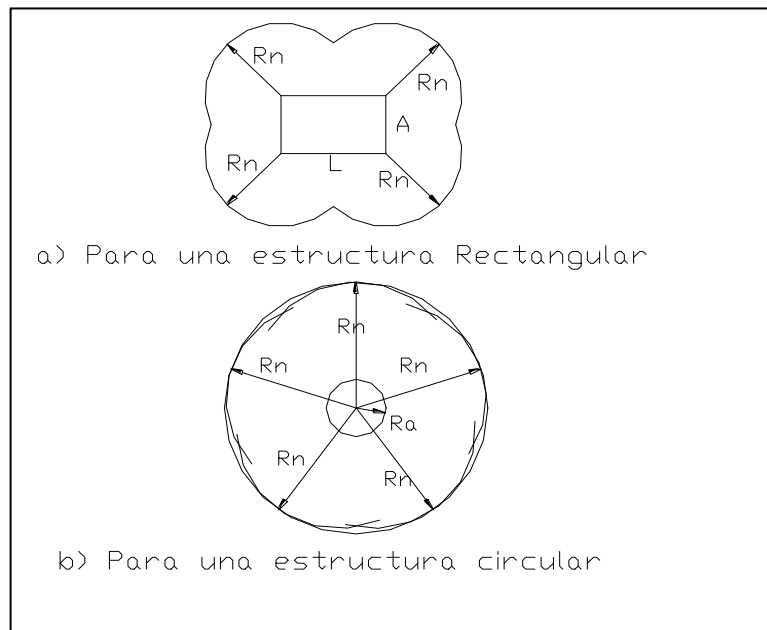


Fig 2.14 Zonas de atracción sobre estructuras

Los radios de atracción se pueden determinar en base a la altura de la estructura mediante la tabla 2.4.

| ALTURA DE LA ESTRUCTURA H (m) | PROBABILIDAD DE LOS RADIOS DE ATRACCIÓN R (m) |
|--|--|
| 5 | 30 |
| 7 | 34.4 |
| 8 | 36.6 |
| 9 | 38.8 |
| 10 | 41 |
| 12 | 44.6 |
| 14 | 48.2 |
| 15 | 50 |
| 16 | 51.2 |
| 18 | 53.6 |
| 20 | 56 |
| 22 | 58.4 |
| 24 | 60.8 |
| 26 | 63.2 |
| 28 | 65.6 |
| 30 | 68 |

| | |
|------|-------|
| 32 | 69 |
| 34 | 70 |
| 36 | 71 |
| 38 | 72 |
| 41 | 74 |
| 43 | 75 |
| 47 | 77 |
| 51 | 78.56 |
| 55 | 80.63 |
| → 60 | → 82 |

Tabla 2.4 Radios de atracción probables.

Como se conoce no existe un método por medio el cual se pueda evitar la ocurrencia de las descargas atmosféricas; por esta razón la solución se ha orientado a los sistemas de protección (apantallamiento) contra descargas directas, mismos que permiten interceptar y desviar a tierra antes que alcance una estructura o equipo en general.

Existen varias técnicas de diseño para el cálculo y determinación de las formas geométricas de las zonas de protección ofrecida por los sistemas de pararrayos a fin de interceptar a los rayos y de poder controlarlos.

2.4.1. CONO DE PROTECCIÓN.

El cono de protección es el método más antiguo contra descargas atmosféricas directas, este describe un volumen o zona de seguridad alrededor del elemento captor (pararrayos). Por lo tanto, las instalaciones que se encuentran dentro de esta superficie cónica tendrá una incidencia mínima de ingreso de descargas.

La imitación que presenta este concepto es cuando se aplica a estructuras muy elevadas, pues hace pensar en la existencia de volúmenes de protección muy grandes, ya que la zona estimada es función de la altura de la estructura del pararrayo (torre).

En la actualidad de acuerdo a la norma IEEE S&D 142-1972, la relación de seguridad altura / base del cono es de 1:1 para casos de protección importantes y 1:1.5 para casos de menor importancia. Para la norma Draft IEC establece que las zonas de protección se basen en ángulos de proyección, tales ángulos deben reducirse conforme se incrementa la altura de la estructura, pero tal reducción no elimina por completo el riesgo de una descarga sobre el área protegida. Ver figura 2.15.

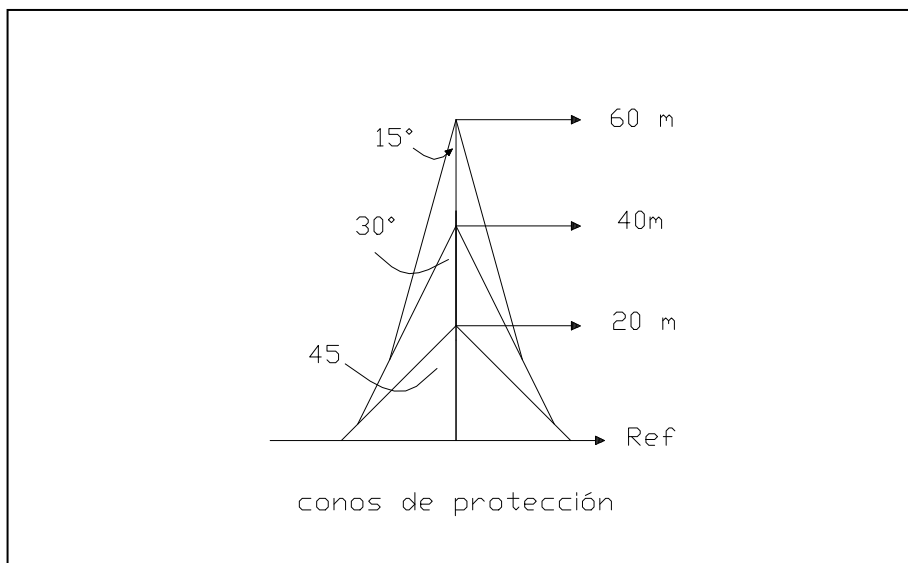


Fig 2.15. Conos de protección

Según Sargent, el ángulo de protección de un pararrayo de altura h , esta dada por la siguiente expresión:

$$\text{Tg } \theta = 50.8/(h^{0.707}) \quad (2.14)$$

$$R = 50.8 \times h^{0.293} \quad (2.15)$$

En la que: θ = ángulo de protección.
 h = altura del pararrayo en pies.
 r = radio del área protegida.

Aunque este método de diseño no toma en cuenta las magnitudes de corriente de descarga probable al evaluar la zona de protección, ofrece una herramienta grafica simple para establecer el número de terminales de aire a ser instalados. Pero, solo se aplica este concepto de protección para estructuras de baja y mediana elevación.

2.4.2. RADIOS DE PROTECCIÓN.

De acuerdo al modelo electro geométrico, un canal de conducción explora un punto de descarga en las proximidades de las estructuras más cercanas (elevadas) dentro de su trayectoria. Así pues, el canal alcanza la denominada distancia critica de atracción entre la punta del canal y el punto de impacto, da origen a la descarga principal o remota de impacto. En esta situación a la distancia critica se lo denomina distancia de impacto **Di**.

En donde, la zona de protección se sitúa en el interior del cono que tiene forma de una envoltura circular (figura 2.16). Los valores de los radios de la envoltente **Di** dependen de la carga del canal, y por lo tanto de la magnitud de la corriente del rayo. Luego entonces, a mayor carga se tiene un mayor radio.

El método aquí descrito permite evaluar zonas de protección para toda clase de corrientes de rayo esperadas sobre una región determinada, ya que el valor de la magnitud de corriente del rayo determina la altura del pararrayos a instalarse, de donde se tiene:

$$r = h. \quad (2.16)$$

Donde **r** es el radio de la envoltente, el cual es pequeño para valores de corriente de descarga débiles y, **h** es la altura del pararrayos.

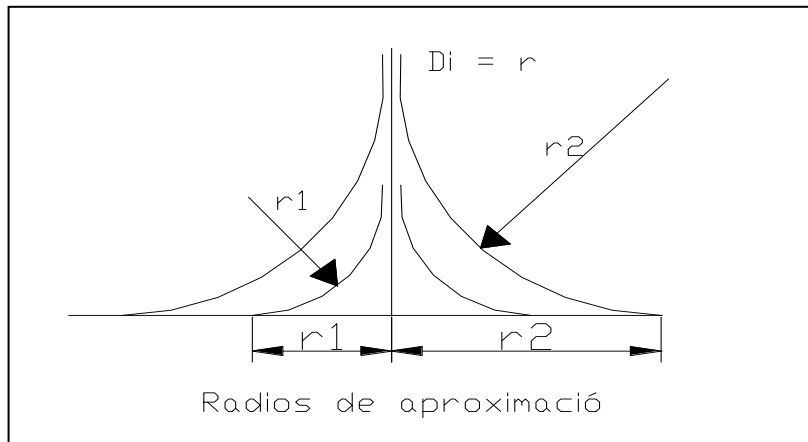


Fig. 2.16 Radios de aproximación.

2.4.3. CILINDRO DE PROTECCIÓN (GOLDEN).

Golde introduce el concepto de zona de atracción sobre los sistemas de pararrayos verticales, el autor asume que el punto de incidencia de una descarga, esta relacionado con la altura del pararrayo (**h**) y por la distancia de impacto (**Di**). En la figura 2.17 se observa que cuando la punta del canal descendente se aproxima hacia el punto **P** de la estructura desde cualquier ángulo e ingresa a la zona sombreada con líneas horizontales, será atraída hacia el suelo. La zona libre de riesgo dado por el pararrayo se describe mediante un cilindro alrededor del, cuyo radio de la base estará dado por:

$$r = (2 \cdot Di \cdot h - h^2)^{1/2} \quad \text{si } Di > h \quad (2.17).$$

$$r = Di \quad \text{Si } Di < h \quad (2.18)$$

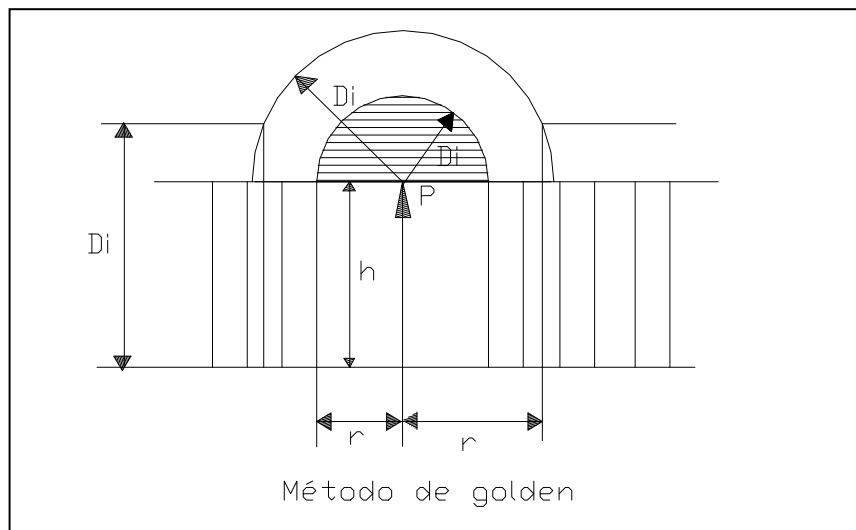


Fig. 2.17. Zona de protección utilizando el Método de Golden

El valor de la distancia de impacto, es obtenido de la tabla 2.5. donde se relaciona la distancia D_i con la magnitud de la corriente de descarga.

PROBABILIDAD DE LA FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE

| Carga de conducción (Q) (Coulomb) | Pico de corriente I (KA). | Distancia de impacto D_i (m). | Distancia de impacto D_i (m). | Nivel máximo de protección. (%) |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0.5 | 6.53 | 33.84 | 30.04 | 98 |
| 0.7 | 8.26 | 39.44 | 36.27 | |
| 0.9 | 9.85 | 44.22 | 41.75 | 96 |
| → 1 | → 10.60 | 46.39 | 44.29 | → 93 |
| 1.3 | 12.74 | 52.27 | 51.30 | |
| 1.5 | 14.08 | 55.79 | 55.58 | 86 |
| 1.7 | 15.37 | 59.06 | 59.62 | |
| 2 | 17.22 | 63.59 | 65.30 | 78 |
| 2.3 | 18.99 | 67.77 | 70.61 | |
| 2.5 | 20.13 | 70.39 | 73.99 | |
| 2.7 | 21.25 | 72.90 | 77.25 | |
| 3 | 22.87 | 76.48 | 81.94 | 67 |

| | | | | |
|-----|--------|--------|--------|----|
| 3.5 | 25.48 | 82.04 | 89.33 | |
| 4 | 27.97 | 87.17 | 96.27 | |
| 4.5 | 30.38 | 91.97 | 102.83 | |
| 5 | 32.70 | 969.49 | 109.08 | 50 |
| 6 | 37.15 | 104.84 | 120.8 | |
| 7 | 41.39 | 112.45 | 131.70 | 33 |
| 9 | 49.35 | 126.45 | 151.60 | |
| 10 | 53.13 | 132.27 | 160.81 | 22 |
| 13 | 63.84 | 149.04 | 186.26 | |
| 15 | 70.59 | 159.06 | 201.80 | 14 |
| 18 | 80.17 | 172.82 | 223.50 | |
| 20 | 86.30 | 181.31 | 237.08 | 7 |
| 25 | 100.89 | 200.68 | 268.64 | |
| 30 | 114.63 | 218.04 | 297.51 | 2 |

TABLA 2.5

2.4.4. METODO DE LINK.

El método de Linck, se basa en el modelo electro geométrico, esto significa considerar el proceso de aproximación de descarga de los rayos a objetos sobre tierra para determinar la zona de protección de los mismos, además toma en cuenta el nivel isocerámico de la región, y por lo tanto la densidad de las descargas a tierra para evaluar la efectividad del apantallamiento.

En la figura 2.18, se describe el concepto de la zona de protección, que viene dada por una semiesfera de centro en el punto **T** localizado a una altura **h** (el punto mas alto de la estructura), y de radio **rs**, siendo **B** el punto de intercepción con la trayectoria con la descarga vertical **lp**. Es, posible, entonces evaluar la distancia critica a tierra (**rs_g**) y al punto **T** (**rs**). el área efectivamente protegida por **T** contra descargas atmosféricas directas es proporcional a la cuerda **AB**.

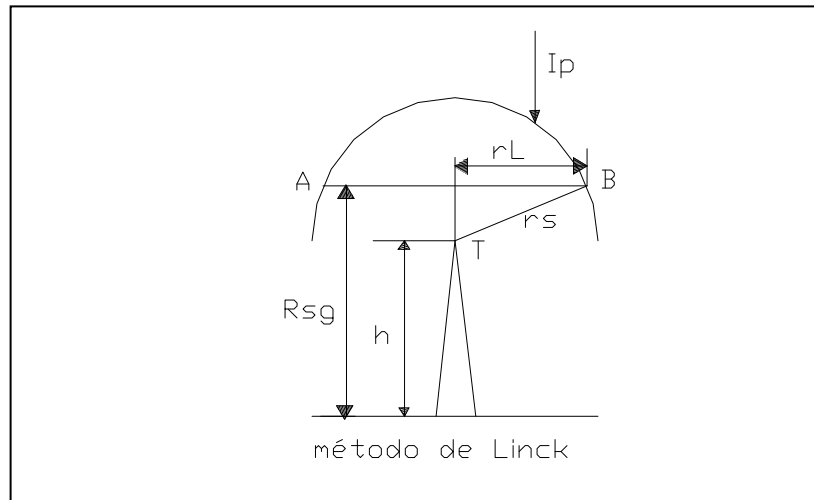


Fig. 2.18. Zona de protección Utilizando el Método de Link.

Por consiguiente, una descarga que descienda sobre el área protegida, será atraída al punto **T** si se aproxima dentro de una distancia crítica.

$$r_L = [r_s^2 - (r_{SG} - h)^2]^{1/2} \quad \text{si } r_s > h \quad (2.19)$$

$$r_L = r_s \quad \text{si } r_s \leq h \quad (2.20)$$

$$r_s = 7.1 \times I^{0.75} \quad (2.21)$$

$$r_{SG} = K_{SG} \times r_{sg}. \quad (2.22)$$

Siendo:

r_L = radio del área protegida.

I = Corriente de descarga en KA.

K_{SG} = Constante dependiente del objeto que se asume como punto de incidencia de descarga

R_s y r_{SG} = Distancia crítica que determina el punto final de incidencia.

Por lo tanto, en teoría el radio r_L es función de la intensidad de corriente probable de descarga y de la altura, es decir, a mayor valor de los mismos mayor será r_L .

El área protegida por el punto T se determina por la relación:

$$A = \pi \cdot (r_L)^2 \quad (2.22)$$

Donde **A** es el área protegida, aproximándole a un rectángulo de longitud L y ancho W, además, el método de Linck permite una estimación de riesgo de falla del apantallamiento (periodo de apantallamiento) que explicaremos más adelante

2.4.5. VOLÚMENES DE COLECCIÓN.

La obtención de volúmenes de colección es un concepto de diseño que debe ser entendido mediante el proceso de aproximación del canal del rayo. La carga negativa Q deposita a lo largo del canal descendente produce un rápido incremento del campo eléctrico entre el canal y puntos sobre el suelo. Cuando el valor del campo alcanza el valor crítico, desde la tierra se forman varios flujos ascendentes que se propagan a fin de interceptar el canal. La distancia en el cual ocurre aquello se la denomina distancia de impacto Di.

En la figura (2.19) se muestra como es posible formar una distancia de impacto semiesférica alrededor de un punto sobre el suelo. La distancia de impacto revela que los canales de conducción con carga eléctrica débil se acercan mucho más a los puntos del suelo antes de alcanzar las condiciones críticas para el inicio del flujo (canal) ascendente.

Desafortunadamente este método sencillo de creación de una distancia de impacto semiesférica no es infalible en la práctica. Adicionalmente se debe tomar en cuenta el parámetro de velocidad relativa de propagación entre los canales descendente / ascendente formulado por Erickson, este valor de velocidad indica que los canales de conducción registran un cierto radio de atracción **R** desde el punto escogido.

En la figura (2.19) se puede apreciar el lugar geométrico semiesférico junto con el trazado de la parábola límite, obtenida a partir del factor velocidad que completa nuestro volumen de colección. De modo que el canal descendente o rayo que ingresó al volumen se asegure teóricamente la intersección con el flujo ascendente lanzado sobre la base de la parábola. También es probable que el canal que lleve el camino trazado por la parábola puede ser no interceptado.

Los volúmenes de colección llegan a ser tan extensos con el incremento de la carga del canal lo que produce traslapes en el área de captura cuando consta de varios terminales de aire. En el caso, de estructuras altas la disposición vertical de la zona de seguridad puede ser excesiva, lo que conduce a tener unos 15 grados de inclinación a ser aplicados desde lo alto del borde del volumen de colección. La figura 2.19 muestra la aplicación de este concepto.

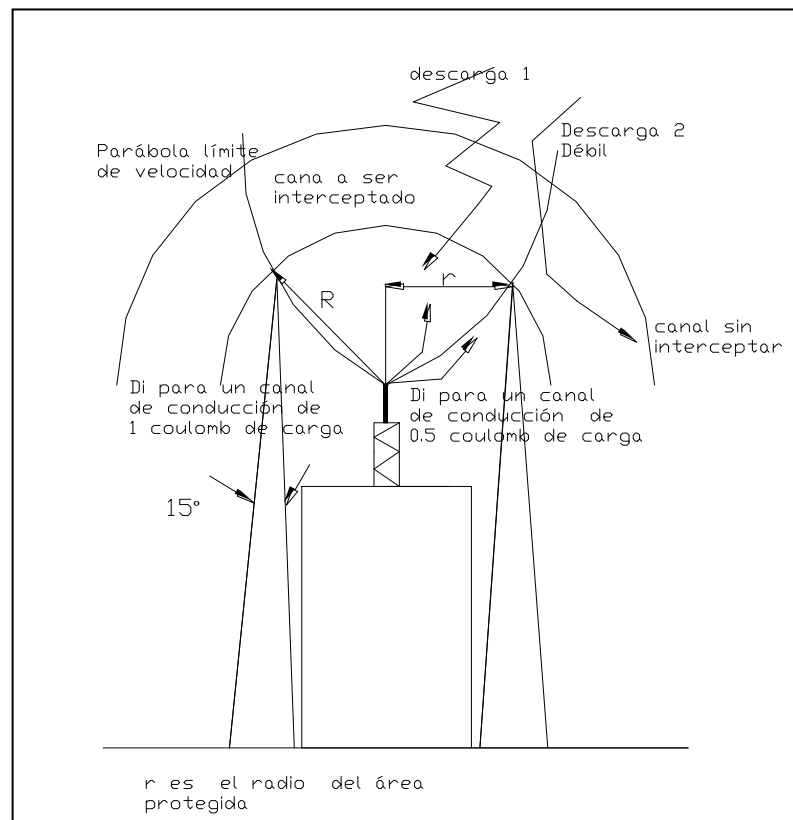


Fig 2.19 Concepto de volúmenes de colección

2.5. APANTALLAMIENTO CON ELEMENTOS DE IONIZACIÓN.

A fin de conseguir una zona de protección más efectiva contra los defectos de una descarga directa, se propone. La instalación del sistema de elementos de ionización.

Existen 2 tipos de elementos de ionización:

1. Sistema de Ionización de auto cebado. La cual crea una zona ionizada más amplia y dinámica, lo que elimina la Ineficiencia del flujo ascendente de conexión con el canal descendente que presenta el tipo de pararrayos convencional, ya que al disponer de fuentes radioactivas que emiten continuamente partículas radiactivas, provocando una región ionizada del aire más amplia, liberando electrones, que proporcionan caminos fáciles para las descargas del rayo en dirección al terminal captor, es decir que genera electrones o cargas de signo contrario a la de la nube al aproximarse la tormenta, para que se descargue por medio de este y poder enviarlo a tierra en forma controlada y no cause ningún daño.

El propósito de **Pararrayo** es mejorar el desarrollo de la conductividad hacia arriba del líder creando un intenso efecto corona en la punta, este aparato además produce la ionización requerida en el momento preciso, en el instante de mayor riesgo de descarga de un rayo, La ionización es creada por el paso o salto de la chispa entre la punta del pararrayo y los electrodos ubicados en los costados de la punta, como muestra la figura 2.20.

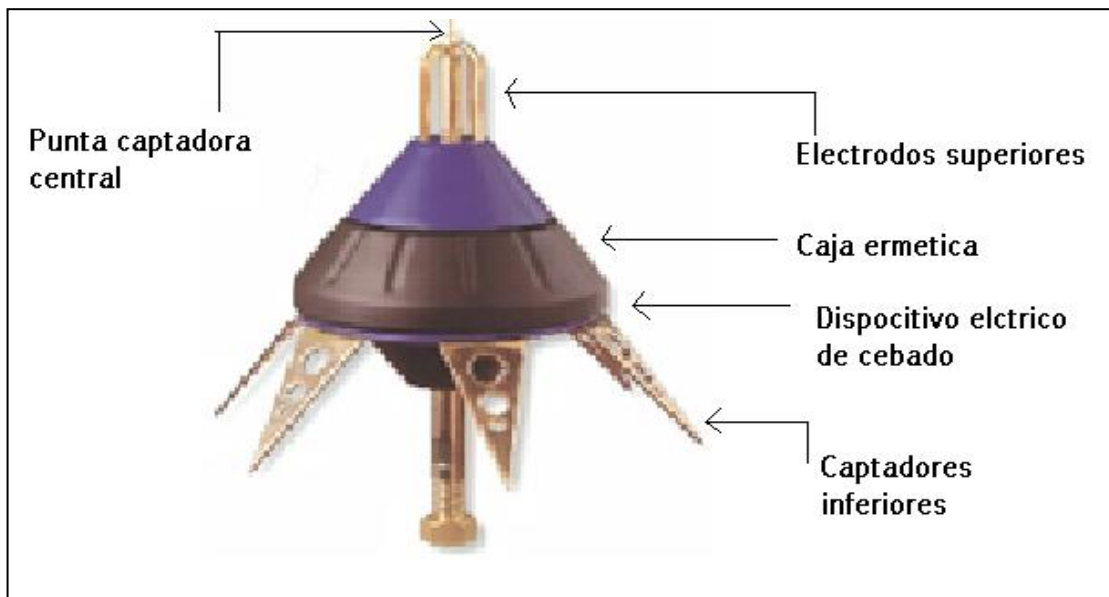


FIG.2.20. Pararrayo con auto cebado

2.5.1 DESCRIPCIÓN:

1. Electrodo Superiores.- sirve para la generación de las chispas.
2. Punta Captadora Central.- es de cobre electrolítico o de acero inoxidable, que atraviesa el pararrayo, creando de esta forma un camino continuo que conduce la descarga del rayo hacia la tierra, que esta sujeta a un mástil añadido de 2 metros mínimo.
3. Dispositivo eléctrico de cebado.- esta blindado en caja protectora.
4. Una caja hermética.- De acero inoxidable lacado de negro (versión punta cobre) o natural (versión punta acero inoxidable), siendo la misma conectada a masa, en el cual se encuentran los condensadores para almacenar la energía necesaria.

5. Captadores Inferiores.- Sirve para obtener la energía ambiental.

El Este tipo de pararrayo aprovecha la energía del campo eléctrico ambiental que aumenta en forma considerable al aproximarse las tormentas, para alcanzar varios millones de voltios por metro (campo eléctrico), sus captadores inferiores permiten almacenar la energía eléctrica dentro del dispositivo de ionización cuando la descarga es eminente, se observa un repentino incremento del campo eléctrico local, que es detectado por el elemento con dispositivo de cebado, esta información permite activar el dispositivo eléctrico de cebado que libera la energía acumulada a través de los electrodos superiores, provocando una ionización en la parte superior de la punta.

Este elemento tienen algunos electrodos llamados “censores de energía “ ubicados en la proximidad de la punta o varilla franklin y conectados a este y por lo tanto a tierra, por medios de capacitores.

Las pruebas muestran que los capacitores pueden ser cargados por sensores de energía o por flujo de iones o por un divisor de corriente capacitaba. Es natural que la carga por flujo de iones será dependiente de la concentración de iones en el aire. La cual es siempre alta durante una tormenta. La presencia de un campo eléctrico causado por una tormenta, permite a los sensores de energía que el capacitor se cargué a un cierto nivel de tensión, de esta manera almacenar energía eléctrica. El condensador se auto recargan por si solo por un acoplamiento capacitivo cuando el campo eléctrico varía entre la nube y tierra y por el efecto corona al nivel de los sensores (electrodos superiores).

Cuando un rayo cae existe eminentemente (el líder viene desde la nube la descarga es un rayo hacia abajo) un rápido incremento del campo eléctrico local lo cual incrementa la carga en el condensador por un acoplamiento capacitivo, este rápido incremento del campo eléctrico crea una rápida variación en la tensión (dv/dt) lo cual puede ser detectado por un filtro de alta

tensión. Esta información hace posible el encendido de un aparato eléctrico, el cual transforma la energía acumulada en encendido.

A continuación se presentan los radios de protección que pueden cubrir estos elementos, para diferentes niveles de protección, a diferentes alturas de instalación y para diferentes modelos de los elementos de ionización.

NIVEL I (D = 20m) RADIOS DE PROTECCIÓN

| H (m) >> Modelos | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 15 | Max 20(m) |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------|
| S 6.60 | 31 | 47 | 63 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | 80 | 80 |
| S4.50 | 27 | 41 | 55 | 68 | 69 | 69 | 69 | 69 | 70 | 70 |
| S 3.40 | 23 | 35 | 46 | 58 | 58 | 59 | 59 | 59 | 60 | 60 |
| TS 3.40 | 23 | 35 | 46 | 58 | 58 | 59 | 59 | 59 | 60 | 60 |
| TS 2.52 | 17 | 25 | 34 | 42 | 43 | 43 | 43 | 44 | 45 | 45 |

Tabla 2.6 Rp Máximo a una Altura de 20m de los diferentes modelos

NIVEL II (D = 45m) RADIOS DE PROTECCIÓN

| H (m) >> Modelos | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 | Max 45(m) |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|--------------|
| S 6.60 | 39 | 58 | 78 | 97 | 97 | 98 | 99 | 101 | 102 | 105 |
| S4.50 | 34 | 52 | 69 | 86 | 87 | 87 | 88 | 90 | 92 | 95 |
| S 3.40 | 30 | 45 | 60 | 75 | 76 | 77 | 77 | 80 | 81 | 85 |
| TS 3.40 | 30 | 45 | 60 | 75 | 76 | 77 | 77 | 80 | 81 | 85 |
| TS 2.52 | 23 | 34 | 46 | 57 | 58 | 59 | 61 | 63 | 65 | 70 |

Tabla 2.7 Rp Máximo a una Altura de 45m de los diferentes modelos

NIVEL III (D = 60m) RADIOS DE PROTECCIÓN

| H (m) >> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 20 | 45 | Max 60(m) |
|----------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|
| Modelos | | | | | | | | | | |
| S 6.60 | 43 | 64 | 85 | 107 | 107 | 108 | 109 | 113 | 119 | 120 |
| S4.50 | 38 | 57 | 76 | 95 | 96 | 97 | 98 | 102 | 109 | 110 |
| S 3.40 | 33 | 50 | 67 | 84 | 84 | 85 | 87 | 92 | 99 | 100 |
| TS 3.40 | 33 | 50 | 67 | 84 | 84 | 85 | 87 | 92 | 99 | 100 |
| TS 2.52 | 26 | 39 | 52 | 65 | 66 | 67 | 69 | 75 | 84 | 85 |

Tabla 2.8 Rp Máximo a una Altura de 60m de los diferentes modelos

Para determinar los valores del tiempo de cebado de estos elementos podemos guiarnos en la tabla 2.9 que tiene para diferentes modelos.

| Modelo | Δt (μs) | Ref (cobre) | Ref (inox) | Peso (Kg) |
|----------------|------------------------|-------------|------------|------------|
| S 6.60 | 60 | 1241 | 1242 | 4.2 |
| S 4.50 | 50 | 1231 | 1232 | 4.0 |
| S 3.40 | 40 | 1221 | 1222 | 3.8 |
| TS 3.40 | 40 | 1221 | 1212 | 2.5 |
| TS 2.25 | 25 | 1201 | 1202 | 2.3 |

Tabla (2.9) Tiempo de cebado del elemento

2. Sistema de Disipación o Aparta-rayos DAS.

El cual evita que se den las condiciones atmosféricas para que se produzcan (rayos) en un sitio determinado. Las descargas son evitadas al reducir

continuamente las diferencias de potencial eléctrico entre el área protegida y la nube.

El elemento captor o disipador posee miles de pequeñas puntas, o ionizadores, que producen iones simultáneamente sobre una extensa zona. Una corriente de iones positivos o corrientes de ionización puede subir hasta la nube, impidiendo de esta manera la formación de rayos descendentes, precursoras de la descarga del rayo

Cabe indicar que para el análisis de diseño de los sistemas DAS, este depende de dos factores:

- Número de puntas requeridas por unidad de área protegida: en ningún caso el ionizador debe tener menos de 2000 puntas espaciadas a un mínimo de 10 cm y cada cable que compone el disipador este separado por lo menos 10 cm, cuyo conjunto forma una “matriz de puntas”.

- Estimación de la corriente de ionización a disipar dentro de la zona de interés: el valor de la corriente viene determinada por el tamaño del área a ser protegida, por la variación de la carga en la base de la nube y el tamaño de la

nube, tomando en cuenta que estos dos últimos parámetros se basan en las probabilidades.

Finalmente basándose en los datos acumulados y a los 20 años de experiencia, LEC ha diseñado sistemas DAS que permiten eliminar al menos 199 descargas de 200; es decir de cada 200 descargas que se presente, una descarga penetra en el área protegida. En el caso de sistemas DAS de alta efectividad están diseñadas para evitar al menos 999 de 1000 descargas, pero el tamaño y costo del ionizador influye considerablemente en su instalación.

El DAS se basa en el fenómeno de disipación natural conocido como el principio de descargas en punta, mediante la utilización de miles de pequeñas puntas o ionizadores que producen iones simultáneamente sobre una extensa área, en presencia del fuerte campo y el viento hacia las nubes, evitando de esta forma que se rompa el dieléctrico del aire y se produzca el rayo. El flujo de corriente empieza cuando el campo eléctrico creado por la nube, activa el DAS y continúa incrementándose a medida que se acerca, esta corriente de iones continuara hasta que la tormenta cese o pase.

Estos ionizadores son tan efectivos que bajo intensas tormentas pueden brillar debido al volumen de iones producidos, sin que ocurra la descarga del rayo.

Los DAS están especialmente diseñados para cada aplicación. Se dimensionan diferentes tamaños, alturas, según el tipo de instalación, altitud y valor isocerámico. La configuración más usada es el dissipador hemisférica, que tiene la forma de paraguas; usadas para proteger torres o en conjunto con los ionizadores para estructuras elevadas, tales como antenas, edificios, subestaciones, instalaciones de radar, depósitos de combustibles, entre otros.

III. PUESTA A TIERRA.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA NESECIDAD DE UNA PUESTA A TIERRA.

Un sistema eléctrico y electrónico requiere de una instalación de puesta a tierra, el no hacer lo puede traer como consecuencia daños significativos en los equipos del sistema y afectar a la seguridad de las personas.

En general, la puesta a tierra (conexión a tierra o aterrizaje) es el proceso de realizar una unión eléctrica entre determinados elementos de instalación y la tierra misma.

De acuerdo a este principio, la necesidad de una puesta a tierra se establece para conducir a tierra, las corrientes (pequeñas o de gran intensidad) de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya sea que se traten de corrientes de falla, desequilibrios de los sistemas de distribución de energía, o por descargas eléctricas; con ello se logra:

- ▶ Establecer y mantener un potencial de tierra o punto de referencia común para todos los equipos electrónicos
- ▶ Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre puntos de la superficie del suelo o entre puntos del terreno y objetos conductores.
- ▶ Asegurar la operación rápida de los dispositivos de seguridad como relés, fusibles, etc.
- ▶ Reducir los valores de ruido eléctrico y diafonía inducidos en circuitos de telecomunicaciones.

- ▶ Servir como línea de retorno a ciertos sistemas, como por ejemplo: en los neutros de los generadores, transformadores de distribución, descargadores de pararrayos, etc.
- ▶ Ayudar a neutralizar los efectos transitorios de voltaje y corriente producido por descargas atmosféricas, ya que ofrece un camino de baja impedancia a tierra.
- ▶ Poner a tierra y unir los encerramientos metálicos y estructuras de soporte que pueden ser tocados por las personas (Puesta a tierra del equipo).

En realidad, el proceso de realizar una conexión eléctrica a tierra involucra no un punto de contacto sino más bien un volumen de tierra. Pues, se sabe que entre 90y 95 por ciento de la resistencia final de un electrodo a tierra se establece dentro del suelo circundante al electrodo. Así, el suelo contenido dentro de un volumen hemisférico alrededor del electrodo (varilla) formado por radios igual a 1.1 veces la longitud del electrodo embebido en el suelo es referido como “**hemisferio de interfase**” (HI), como se muestra en la figura 3.1. por lo tanto, éste volumen ejerce la mayor influencia en la resistencia de aterrizaje del electrodo.

De acuerdo a lo expuesto, se ha determinado que la resistencia de un electrodo a tierra R es la suma de componentes:

$$R = 0.9 \times R1 + 0.1 \times R2 \quad (3.1)$$

Siendo:

R1 = Resistencia del suelo dentro del hemisferio de interfase

R2 = Resistencia promedio del suelo en el resto de la tierra.

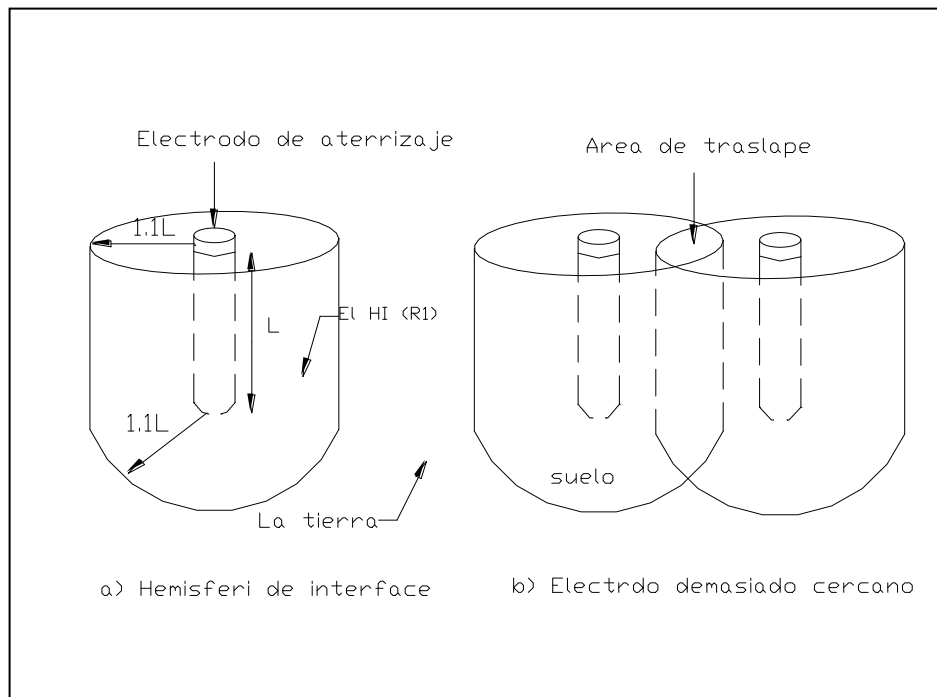


FIG. 3.1 Hemisferio de interfase.

3.1.1. DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES Y POTENCIALES EN SUELO HOMOGÉNEO.

Si se inyecta una corriente I en terreno homogéneo a través de un electrodo, las líneas de corriente se esparcirán radialmente en todas las direcciones. Si se mide la caída de tensión entre el electrodo de tierra y puntos determinados alrededor de él, con un voltímetro y un electrodo auxiliar y llevamos a un gráfico los valores medidos, se determina que las superficies equipotenciales son semiesferas concéntricas en torno al electrodo y cuyas intersecciones con la superficie del suelo, tendrán forma circular. La figura 3.2 indica los resultados de las medidas efectuadas en la zona próxima a un electrodo tipo varilla; en la parte superior se ha representado en forma de círculos y en 3.2.b, por el sistema de coordenadas rectangulares.

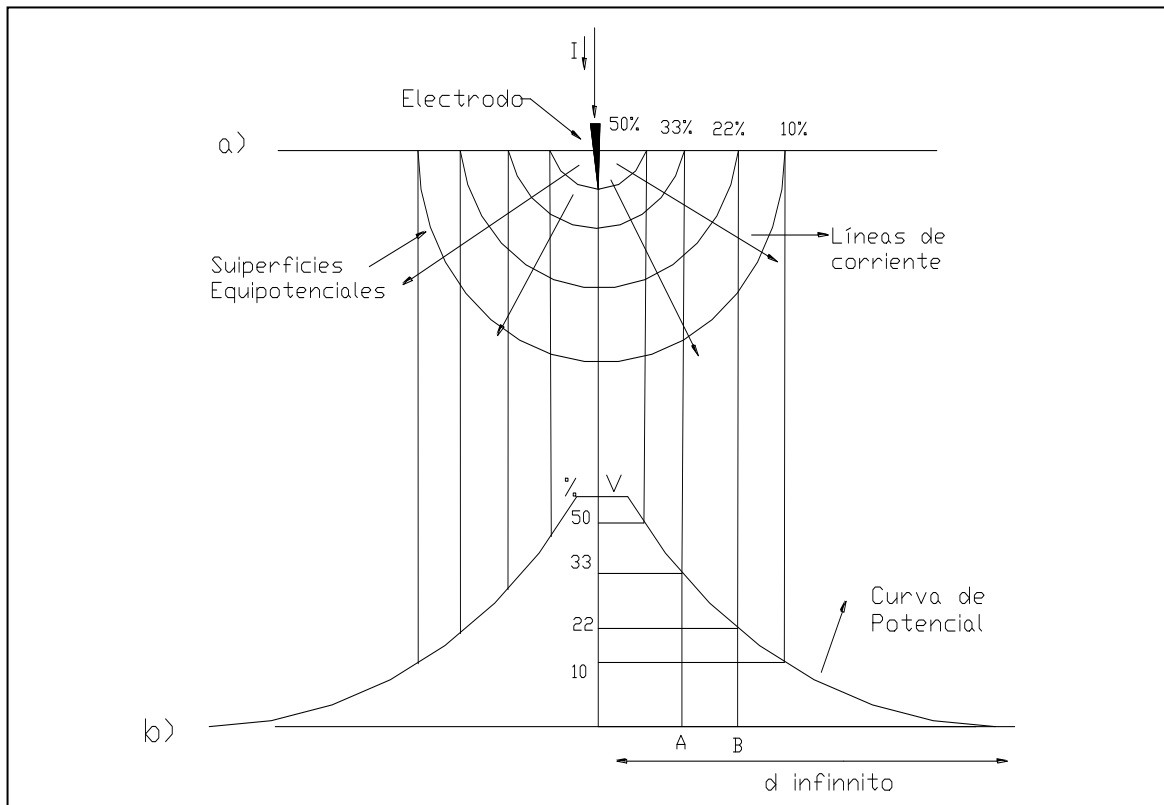


Fig. 3.2. Reparto de la corriente y potenciales

De lo que se deduce que la caída de tensión entre dos puntos (A,B) es mayor en la zona próxima al electrodo y disminuye a medida que aumenta la distancia radial desde la toma de tierra; a unos 20 m del referido, resulta inapreciable. La consecuencia de esto es lo que se produce un **embudo o cono de tensión** en los puntos situados alrededor del electrodo de tierra. fig 3.2.b.

Considerando el sistema presentado en la fig 3.3, donde los electrodos de tierra A y B son colocados a una distancia d y entre ellos se aplica una tensión V , en torno de cada electrodo, por el interior del terreno se forma la superficies semiesféricas equipotenciales y el perfil resultante de la curva de potencial, es obtenido al superponer los potenciales individuales correspondientes a A y B, bajo la circulación de las corrientes I y $-I$ respectivamente.

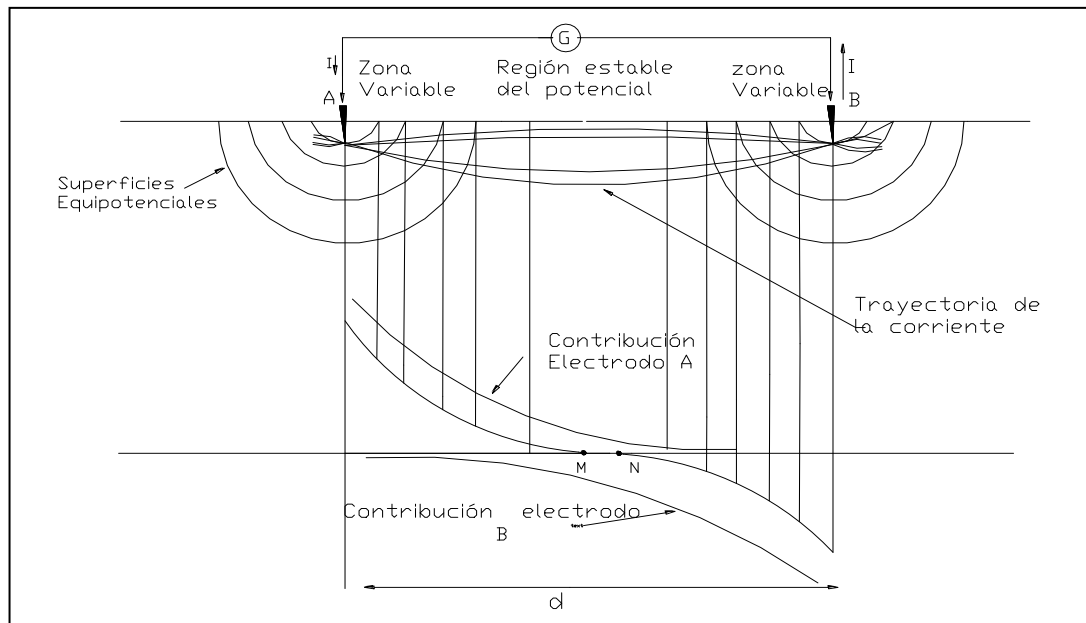


Fig 3.3 Reparto de los Potenciales entre dos puntos

La distancia entre estas superficies es tal que a medida que nos alejamos de un electrodo para el otro, las variaciones de tensión son menores, habiendo una región entre estas tomas de tierra, donde el potencial es aproximadamente constante (casi horizontal), localizado aproximadamente en la mitad de la distancia d .

Es evidente por lo tanto, que la distancia $A B$ debe ser lo suficiente grande con respecto a las dimensiones de los electrodos, de modo que exista una zona de tierra de referencia; es decir, no presenta tensiones apreciables entre dos puntos cualesquiera de dicha zona (puntos M y N de la fig. 3.3. Así mismo cada valor de resistencia encontrada en línea recta entre los electrodos irá variando en función de la distancia y es obtenida según la ley de Ohm.

3.2.FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PUESTA A TIERRA.

La conexión a tierra está influenciada tanto por las condiciones del suelo, como por las características del electrodo.

3.2.1. LA RESISTIVIDAD DEL SUELO (ρ).

La resistividad del suelo es la resistencia que tiene la tierra para oponerse al paso de la corriente eléctrica por unida de longitud (Ω -m). La resistividad del suelo determina la efectividad de una toma de tierra, la cual varía de un lugar a otro de acuerdo a los siguientes factores:

Tipo de suelo: Los terrenos o estratos geológicos no son nunca homogéneos, dando como resultado que las diferentes clases de suelo no están delimitados como para saber, de ante mano, el valor de la resistividad en el punto a ser elegido para efectuar una toma de tierra. En la tabla (3.1) se indica los valores aproximados de la resistividad para distintas clases de terreno.

| Tipo de terreno | Resistividad (Ω -m) |
|--|-----------------------------|
| Terrenos Pantanoso..... | 3 a 30 |
| Lino..... | 20 a100 |
| Humus..... | 10 a 150 |
| Turba húmeda..... | 5 a 100 |
| Arcilla plástica..... | 50 |
| Margas arcillas Compactas..... | 100 a 200 |
| Margas de jurásico..... | 30 a 40 |
| Arena Arcillosa..... | 50 a 500 |
| Arena Silíceas..... | 200 a 300 |
| Suelo Pedregoso de césped..... | 300 a 500 |
| Suelo pedregoso desnudo..... | 1500 a 3000 |
| Caliza compacta..... | 1000 a 5000 |
| Caliza agrietada..... | 500 a 1000 |
| Pizarras..... | 50 a 300 |
| Rocas de Mica y Cuarzo..... | 800 |
| Granitos y Gres procedentes de alteración..... | 1500 a 10000 |
| Hormigón..... | 2000 a 3000 |
| Roca Ígnea..... | 5000 a 10000 |

Tabla. (3.1) Valores de ρ para diferentes tipos de suelo.

Contenido de Humedad: la humedad expresa la cantidad de agua en peso distribuida dentro del suelo, el cual influye de forma apreciable en la resistividad en la figura (3.4a) observamos que la resistividad del suelo disminuye violentamente a medida que el grado de humedad esta en el orden del 15% en peso, a partir de esta cifra la variación de la resistividad es pequeña, a causa de la saturación del terreno. Los valores de ρ (**resistividad**) pueden variar de acuerdo al contenido de humedad y tipo de suelo, como por ejemplo, el barro arenoso es razonablemente conductor con solamente 5% de humedad, mientras la arcilla requiere mas del 14% por peso de esta variable.

Temperatura del suelo: La resistividad del terreno es estable al descender la temperatura, hasta cuando alcanza el punto de congelación (0°C); en ese momento su resistividad se incrementa muy rápidamente debido a que el contenido del agua en la tierra entra en estado de congelamiento dificultando la conducción eléctrica. Para ello en zonas con peligro de heladas los electrodos se enterraran a una profundidad que no alcance esa temperatura.

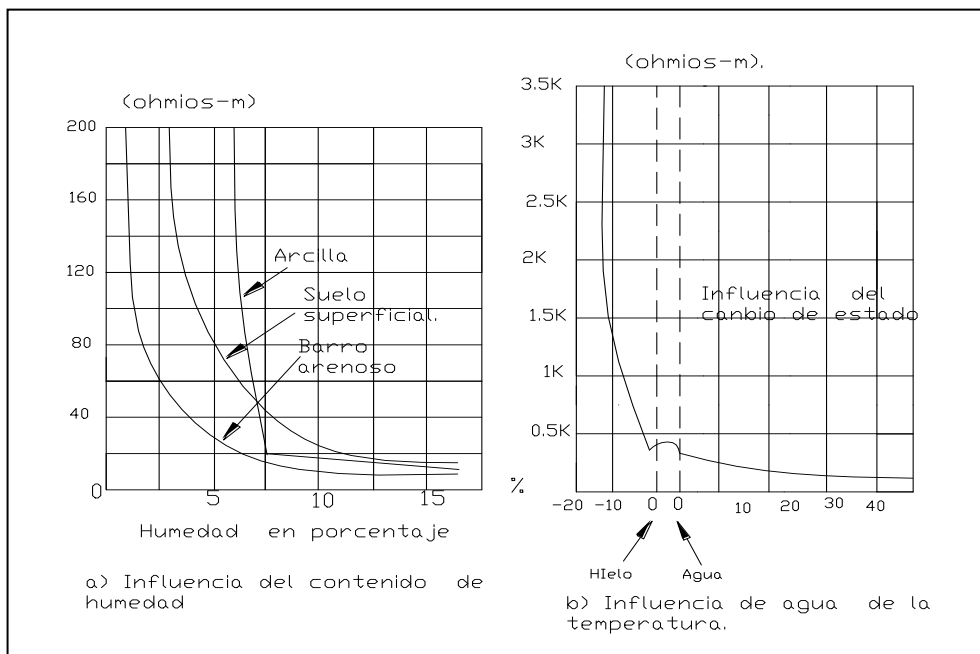


FIG. 3.4. Efecto de la temperatura y humedad

Contenido mineral y su concentración: la concentración de ciertos minerales, ácidos y sales pueden mejorar la conductividad del suelo, pues los componentes del terreno son en estado seco aislantes. Entonces, la conducción de la corriente se realiza principalmente a través del electrolito, que forma las sales y el agua contenida en el terreno natural.

En la figura 3.5 se refleja como la cantidad de sales disueltas afectan la resistividad promedio. Nótese que la resistencia disminuye exponencialmente con el contenido de sal hasta alcanzar aproximadamente 10% (por peso) de la solución. Más allá de esto, la influencia es muy pequeña.

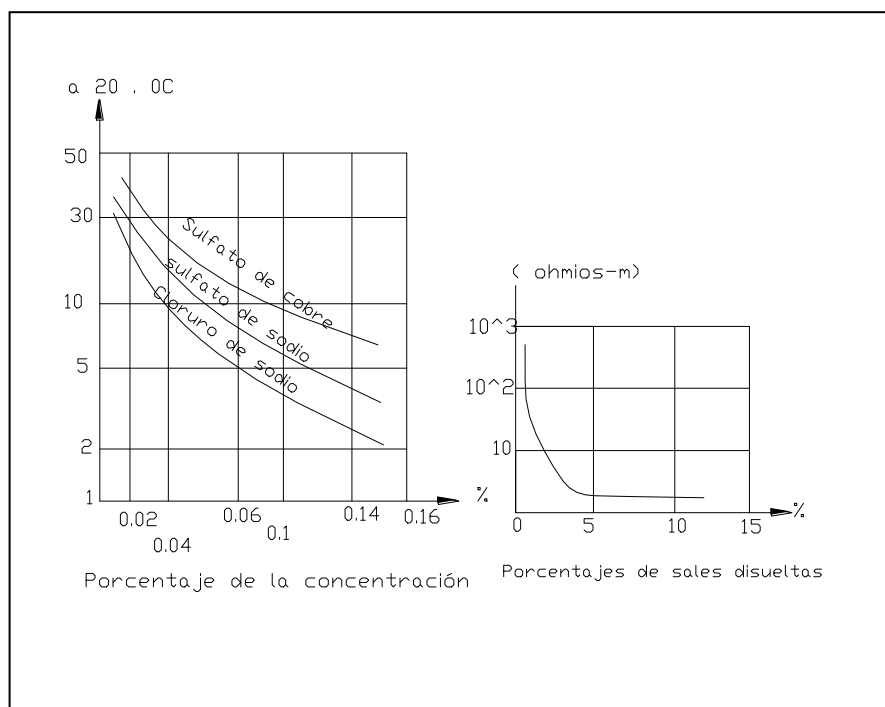


FIG. 3.5. Influencia del contenido de Sales.

Granulometría / Compactación / Densidad: todos estos factores influyen en la conductividad del terreno en general.

- ▶ La resistividad se ve afectada por el grado de compactación del suelo, disminuyendo al aumentar este factor.
- ▶ Entre más denso es el suelo, es decir más pequeño el tamaño de la partícula, la resistividad es menor.

Sin embargo, todo esto es cierto si el suelo es poroso al agua (influye el volumen, disposición y distribución de los poros) y tenga la habilidad de retener la humedad.

La resistividad del suelo es un factor bien importante para el diseño de mallas de tierra, y sobre todo saber como debemos mejorar la resistividad y el proceso de medición.

3.2.1.1 PROCESO DE MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

La medida de la resistividad del suelo es un medio práctico para evaluar las condiciones de una instalación de puesta a tierra, ya, que según la profundidad elegida se determina el arreglo de los electrodos de tierra que mejores resultados técnicos- económicos proporcione. Es fácil concluir que el valor más bajo posible de ρ es deseable para una protección más eficiente.

Como se conoce la resistividad de cualquier tipo de terreno varía con el contenido de humedad y temperatura, con estas condiciones las medidas realizadas varían dependiendo de la época del año, por lo tanto para asegurar una buena aproximación real se debe efectuar varias medidas.

Para conocer la resistividad del suelo, esta se evalúa en forma indirecta, por medio de la medición de un valor R de resistencia de una porción de terreno a una profundidad adecuada, tomando como muestra. Los métodos de medida de ρ

son lo mas variado; a continuación presentamos uno de los más empleados en el sector de telecomunicaciones.

1. MEDICIONES DE ρ MEDIANTE UN ELECTRODO DE PRUEBA.

Consiste en medir la resistencia de tierra de una varilla, enterrada verticalmente en el suelo, de dimensiones conocidas que responden a una formula para determinar ahí la resistividad del terreno que lo rodea. El valor de resistencia del electrodo se evalúa mediante el método tradicional de la caída de potencial. En la figura 3.6 muestra el principio de medición de la resistencia del suelo, para ello se utiliza tres electrodos, hincados en el terreno. Un electrodo de prueba (T), un electrodo de corriente (C), que debe estar suficientemente alejado, y un electrodo de potencial (P), que registra la curva de potencial entre T y C.

Una de las expresiones para la resistencia, de una varilla de longitud L (m), y diámetro d (m), enterradas en un medio homogéneo de resistividad ρ es:

$$R = (\rho / 2.\pi. L) \times \text{Ln}.[(4. L) / d] \quad (3.1)$$

De lo que se deduce:

$$\rho = (2.\pi. L) / \text{Ln}.[(4. L) / d] \quad (3.2)$$

Donde:

L = longitud del electrodo de puesta a tierra.

d = Diámetro del electrodo.

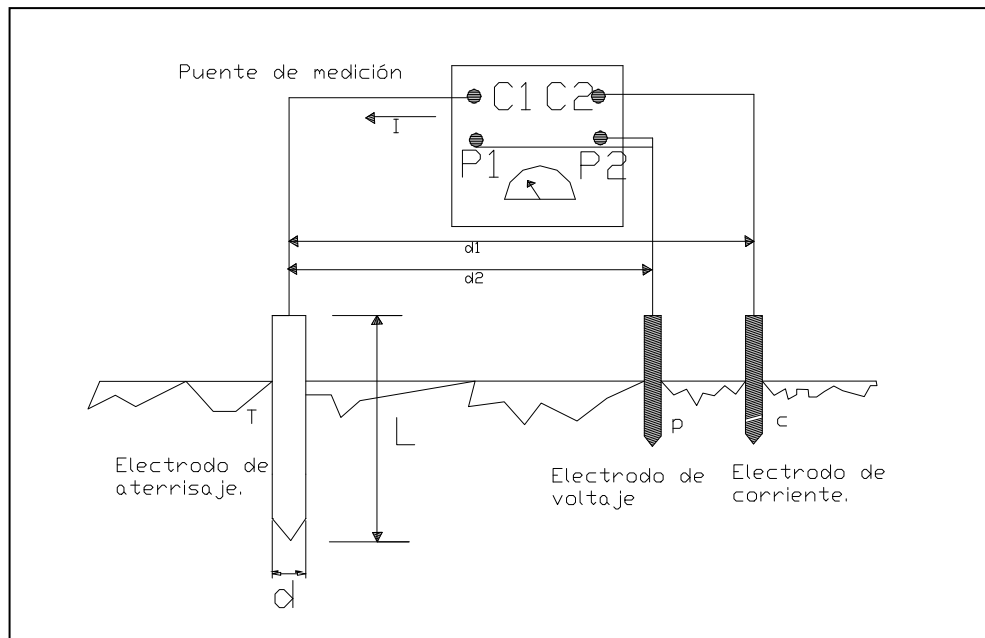


FIG. 3.6 medida de la resistencia del suelo.

2. METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS.

Considerado el de mayor precisión para la determinación de la resistividad del terreno. En este método, cuatro pequeños electrodos son enterrados en el suelo a una misma profundidad H y espaciados simétricamente con respecto al punto O , en la línea recta en los puntos A, B, C, D , conforme se indica en la figura 3.7.

Se hace circular una corriente I de prueba con ayuda de un generador, entre los electrodos extremos (A y B), se considera el terreno homogéneo en todas las direcciones. midiéndose un valor de tensión V que tiene entre los electrodos intermedios (C y D). La relación V/I da la resistencia del terreno a una profundidad h , este valor R es usado para calcular la resistividad ρ con el auxilio de la siguiente expresión.

$$\rho = \pi \cdot [(X^2 - a^2) / 4a] \times [(V_c - V_d) / I] \quad (3.3)$$

$$\rho = \pi \cdot [(X^2 - a^2) / 4a] \times R \quad (3.4)$$

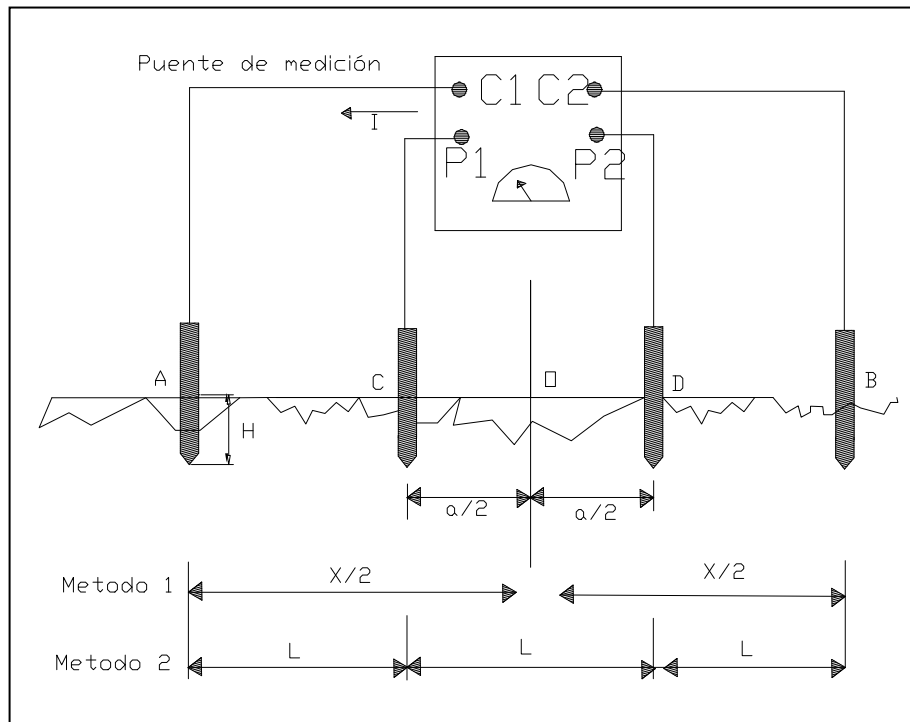


FIG. 3.7 Método de los cuatro electrodos y de Wenner

3. METODO DE WENNER

Se tiene la misma configuración descrita en la figura, los cuatro electrodos se colocan en línea a intervalos iguales (L), dispuestos simétricamente con respecto al punto O en el que se desea medir la resistividad, también se puede calcular la resistividad con la expresión (3.5)

En estas condiciones, la fórmula [3.4] queda simplificada en:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R \quad (3.5)$$

Donde:

R es La resistencia medida en ohmios.

L es la distancia de separación entre electrodos de prueba en metros.

P es la resistividad en ohmios metros

Puesto que el suelo raramente es homogéneo, realmente este método expresa la resistividad aparente de las capas existentes en el suelo bajo el punto O.

De los resultados experimentales se recomienda que la profundidad H de los electrodos no sobrepase el un veinteavo de la distancia L ($H=L/20$); otra consideración es que en la práctica, se puede admitir que la profundidad efectiva de penetración de la densidad de corriente h en el suelo esta comprendida entre $1/3$ o $3/4$ de L, por lo tanto, la corriente penetra más profundamente cuando más alejados estén los electrodos de inyección.

4. PLANO PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD ρ

La experiencia a demostrado que para determinar un valor real de ρ , es aconsejable efectuar más de una medida de la resistencia de tierra R a una misma profundidad y en zonas diferentes dentro del terreno tomando como muestra. También es necesario en lo posible efectuar dicha medición en tiempo seco, tratando de reproducir las condiciones más desfavorables del terreno.

Según realizados por LEC (Lightning Eliminator & Consultants, INC). Se ha probado que el uso de suelo profundo y varillas largas no es efectivo desde el punto de vista de costos. Por lo tanto se recomienda que se considere suelos no más de 3m de profundidad, esto simplifica el proceso de medición.

La figura 3.8 ilustra un procedimiento que puede ser adoptado para la determinación de ρ , en casos de diseños de mallas de tierra de gran extensión.

Cada medida debe realizarse por el método de Wanner y utilizado un Megger industrial (instrumento que da directamente la lectura en ohmios).

Debe trazarse en el plano del terreno líneas numeradas del 1 al 6 y sus diagonales 7 y 8 que forman una "Matriz de líneas", en cada uno de estas líneas se efectúan la medición R a una determinada profundidad y estas lecturas son llevadas a la expresión de ρ . Para un conjunto de medidas de R a una misma profundidad, el ρ promedio está dado por:

$$\rho_1(h) = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_1$$

$$\rho_2(h) = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_2$$

.....

$$\rho_m(h) = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_m$$

$$\rho \text{ promedio} = [\rho_1(h) + \rho_2(h) + \dots + \rho_m(h)] / m \quad (3.6)$$

Donde: ρ_m Valor enésimo calculado a una profundidad h .

m Enésima línea utilizada en la medición.

L Distancia entre los electrodos.

R_m Valor enésimo de resistencia medida.

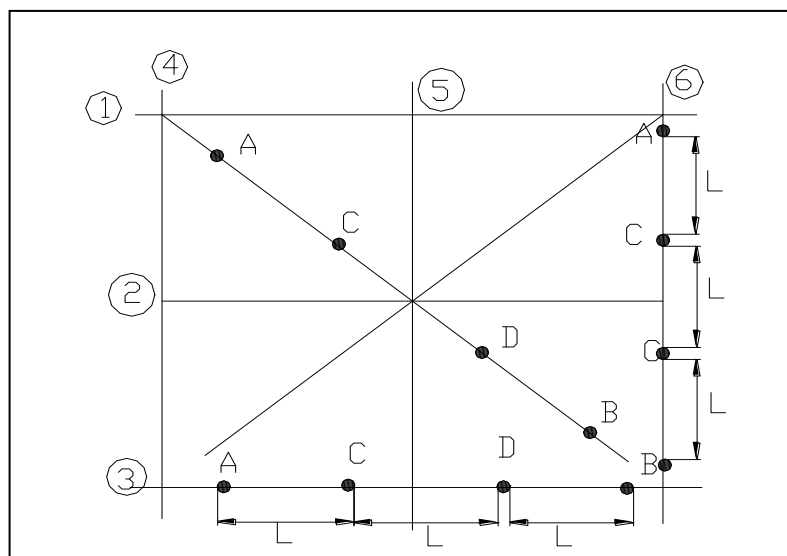


FIG. 3.8 diagrama de la matriz de líneas.

Debe notarse que la validez de estas medidas implica que el suelo tomando como muestra no debe estar sujeta a interferencias extrañas que modifiquen sus propiedades, como son cuerpos metálicos enterrados, o tomas de tierra ya existentes.

Es recomendado para pequeñas áreas de terreno, efectuar 2 medidas como mínimo, con dos líneas perpendiculares entre sí; no obstante como regla general debe hacerse el mayor número de medidas, un valor promedio aceptable es de 8 líneas para una valorización precisa.

Las medidas tomadas se registran en una tabla similar a la ilustrada en la tabla 3.2, esta facilita visualizar los valores R, y estos deben multiplicarse por el factor $K = 2 \cdot \pi \cdot L$, que permite obtener la resistividad del suelo en la franja comprendida entre la superficie y profundidad $h = (3/4) \cdot L$, que se registra en la tercera columna.

| Registro de medición de la Resistividad | |
|---|--|
| Número de medición | Lectura del aparato |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| N | |
| Factor K= Distancia L= | \sum de las ρ = ρ promedio= |

Tabla 3.2. Registro de la resistividad.

Todos los datos previos están basados en la premisa de que el suelo alrededor del electrodo de aterrizaje es uniforme. Sin embargo, en la realidad eso es normalmente falso. La norma establece mediciones en por lo menos dos estratos de diferente resistividad a 3m. De la superficie y a veces más.

Las medidas de la resistividad obtenidas en este tipo de terrenos es una resistividad aparente ρ_a . Además, la evolución del valor ρ_a depende de los valores de la distancia L entre los electrodos de medida, a mayor distancia, la corriente penetra más profundamente en las capas de suelo, si la curva obtenida a través del método Wenner es decreciente, significa que el subsuelo es mejor conductor que el terreno superficial e inversamente para una curva creciente.

pasos para efectuar la medición de ρ

Como queremos medir la resistencia específica del suelo, se procederá del modo siguiente:

- Seleccionamos el lugar más apropiado para la medición.
- Efectuamos el hincado de los 4 electrodos en línea recta, espaciados uniformemente a una distancia L, a una profundidad H igual a 1/20 de L.
- Realizamos las conexiones entre el aparato de medida y tomas auxiliares (Figura 3.6) a través de conductores en la siguiente secuencia:
- Los electrodos de corriente A y B (extremos), se conectan con los bornes de prueba C1 y C2, del medidor, respectivamente.

- Los electrodos de voltaje C y D (intermedios), se conectan con los bornes de prueba P1 y P2, del medidor, respectivamente.
- Procedemos con la medición en toda la zona, según el procedimiento. Estos valores corresponden a la resistencia del suelo en un punto O.
- Las lecturas obtenidas se anotan en la Tabla 3.2 que, junto con el factor, permiten obtener la resistividad aparente del terreno

3.2.1.2 METODO PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE UNA TOMA A TIERRA

Al evaluar la resistencia de un sistema de aterrizaje debe considerarse que el valor determinado puede variar en el curso del tiempo debido a la influencia de la humedad y temperatura del suelo. Cuando el terreno esté húmedo o mojado resultará una menor resistencia que cuando esté seco. Adicionalmente, el hincado del electrodo involucra un volumen de tierra (hemisferio de interfase) en vez de un punto de contacto; tales factores han de ser considerados en cualquier técnica de medición

Las mediciones de la resistencia de puestas a tierra requiere de dos electrodos auxiliares, uno para el retorno de la corriente y otro para la medición del potencial que experimente la misma. Por otro lado, es necesario que los electrodos deban guardar ciertas distancias mínimas con respecto al sistema a medir (tabla 5.2), puesto que cualquier medida que resulte de poner un electrodo de medición dentro de la zona HI de la toma de tierra, o dentro del HI de otro electrodo de medición, producirá lecturas falsas.

1. METODO DE LA CAIDA DE POTENCIAL

Para determinar la resistencia de puesta a tierra se utiliza el método de la “Caída de Potencial” o de “Tres Puntos”. El arreglo para la medición se indica en la Figura 3.9, donde la resistencia de tierra a ser medida esta ubicada en el punto T, se dispone además de dos electrodos auxiliares P y C; entre os puntos T y C se inyecta una corriente I de valor conocido y se mide la diferencia de potencial V entre los puntos T y P. Bajo estas condiciones, el valor del cociente $\Delta V/I$, proporciona la resistencia de tierra del electrodo T.

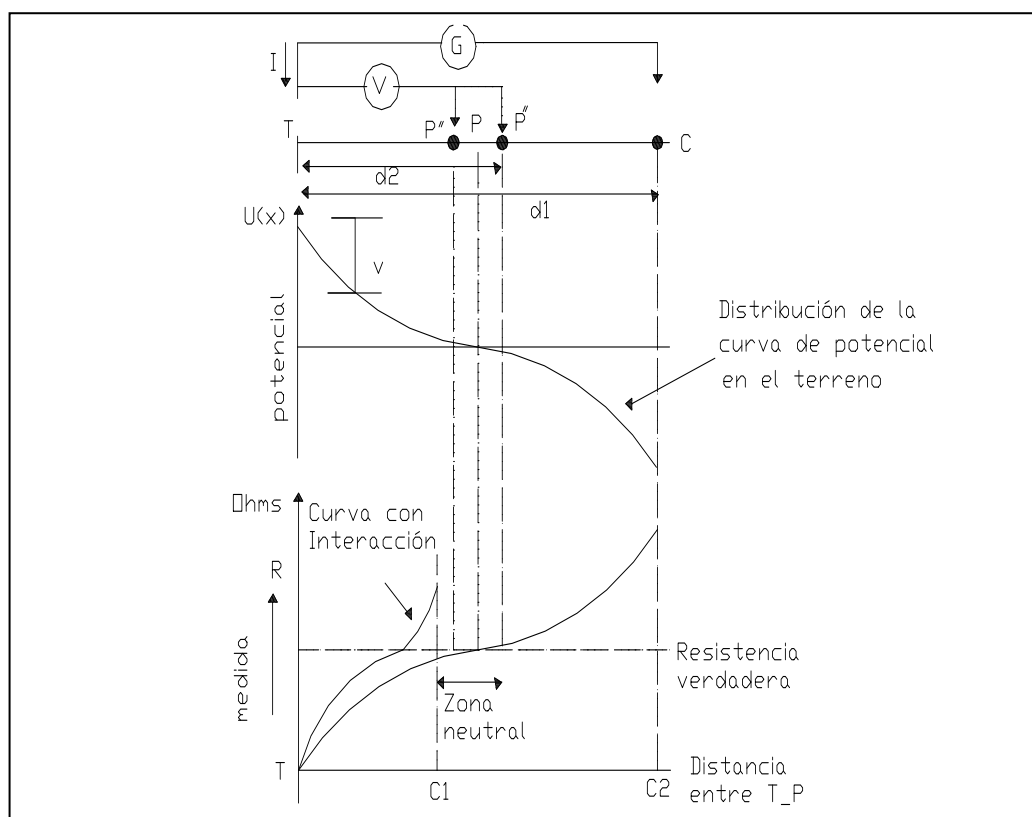


FIG. 3.9. Proceso para evaluar R

Para obtener una medición, hay que introducir el electrodo de corriente C a una distancia d1 suficientemente alejada de T para poder despreciar la interacción mutua entre os dos electrodos, y el electrodo de potencial P se ha de encontrar en un punto de distancia d2 en que la elevación de potencial V sea despreciable (parte horizontal de la curva de potencial). El resultado de la medida es, entonces, prácticamente independiente de la posición de los electrodos. Para asegurar una

medida real, en la práctica la distancia d_2 es igual al 62% de la existente entre T y C. La curva de trazos (Figura 3.9) muestra el efecto de una distancia reducida entre T y C.

| Ejecución | Distancia d_2 | Distancia d_1 |
|---|-----------------------|-----------------|
| Para electrodos individuales de longitud L | a) $0.62 \times d_1$ | 10 veces L |
| | b) 20m | 40m |
| | c) $0.625 \times d_1$ | $>2.2 \times L$ |
| Para sistemas de varillas (múltiples) | $0.625 \times d_1$ | $>5 \times D$ |
| Para sistema de malla cuadrado de lado A | $0.62 \times d_1$ | 3 o 4 veces A |
| Para instalaciones de sistemas de tierra (anular, enmallada, etc.) | 2,5 veces D | 5 veces D |

Tabla 3.3. Distancias Mínimas entre electrodos y toma de tierra

Nota: D es el diámetro de un círculo con igual área que la ocupada por la instalación de p.a.t.

Eventuales corrientes extrañas que circulen por el terreno no deben influir sobre el resultado de la medida. Debe, por lo tanto, emplearse corriente alterna con una frecuencia distinta de la red, situada entre los 85 y 135 Hz, no se utiliza corriente continua porque provocaría la separación de iones de los compuestos químicos que constituyen un terreno y esas cargas desarrollan potenciales opuestos, lo que produciría errores en la medida.

La técnica de medición para determinar la resistencia de aterrizaje se basa en el establecimiento de un puente de resistencia en la cual el terreno provee dos brazos del puente y el equipo de medición suministra los otros dos brazos. Cuando el

punto está equilibrado (no fluye corriente alguna por el electrodo de voltaje), proporcionando una lectura de la resistencia de la toma de tierra.

Cabe indicar, que la medida debe realizarse, para este tipo de instalaciones, preferentemente al final de la estación seca.

pasos para efectuar la medición de la resistencia de puesta a tierra

El proceso consiste en:

- Saber el tamaño y profundidad de la toma de tierra a ser medida, para estimar el HI del sistema.
- Debemos encontrar la mejor área circundante adecuada para el trabajo de medición.
- Proceder a determinar las distancias mínimas d_1 y d_2 , para no falsear los resultados de conformidad a la tabla 3.3.
- Clavamos los electrodos P y C en línea recta según las distancias recomendadas.
- Realizar las conexiones de las tomas T, P, C, con los bornes de prueba C1, P1/P2 punteados, C2 del instrumento de medida respectivamente, como se muestra en la figura 3.9. Estos cables deben estirarse a su máxima longitud en línea recta (radial) desde el punto a ser medido.
- Se balancea el puente y se registra la lectura. Se debe por lo menos hacer otras dos lecturas, variando la distancia d_2 , una moviéndose hacia el punto

T y otro alejándose de él en la misma cantidad. Con ello se asegura que la medida realizada sea la correcta, pues si hay un incremento en la resistencia, la estimación es sospechosa.

Es necesario realizar mediciones periódicas, tanto de resistividad del suelo, como de la resistencia del sistema de aterrizaje, esto permite un conocimiento real de las condiciones en que se encuentra el sistema de puesta a tierra.

Para efectuar las mediciones y pruebas se debe disponer de los siguientes materiales:

- Un instrumento de medida de resistencia de tierra, que posea cuatro bornes.
- 2 o 4 electrodos auxiliares de dimensiones pequeñas, según sea el caso a medir.
- 3 o 4 cables aislados para las conexiones entre los electrodos y bornes del instrumento. El calibre mínimo a utilizar no debe ser menor al #18 AWG.

Se utiliza con más frecuencia el método Wenner y de los tres puntos para determinar los valores de la resistividad del suelo y de la resistencia de puesta a tierra, respectivamente.

3.2.2. INFLUENCIAS DEL FACTOR ELECTRODO.

Las variables a considerar incluye las dimensiones (longitud diámetro), su forma, disposición de la toma (vertical Horizontal) y material utilizado para la fabricación.

El electrodo de aterrizaje puede ser una varilla, un cable, una tubería, una placa o cualquier pieza metálica. Así mismos estos pueden ser de material de cobre, hierro galvanizado, acero revestido de cobre u otro material resistente a la corrosión.

La varilla es la forma más común, cuyo valor de resistencia de aterrizaje depende de su longitud y diámetro.

La figura 3.10 ilustra la influencia de estos factores sobre un electrodo embebido en suelos con resistividad de $100 \Omega\text{-m}$ a medida que la longitud de la varilla crece, el cambio de la resistencia decrece. Parece que las varillas de más de 10 pies (3m) son un desperdicio, cuando no existe la humedad presente a lo largo del año.

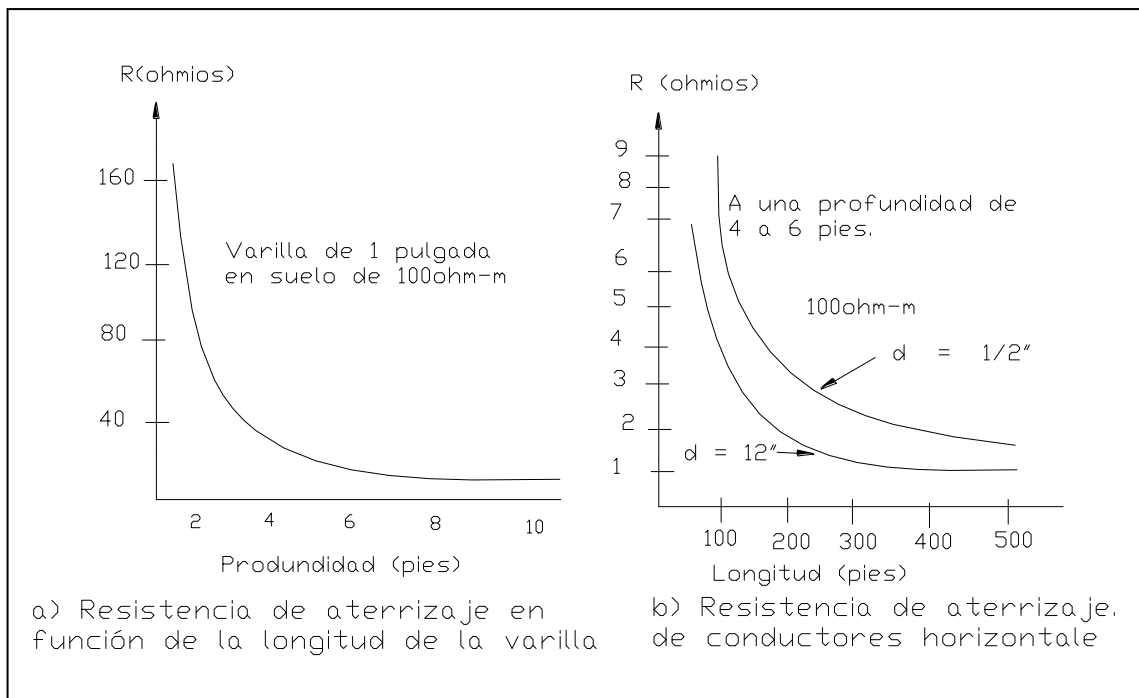


FIG. 3.10. Influencia de las características del electrodo

El uso de las varillas múltiples disminuye el valor de la resistencia de tierra, pero se debe tener cuidado y asegurarse que no hay traslapes entre sus hemisferios de interfase, Pues producirá una pérdida proporcional en la efectividad de interfaces como electrodo de aterrizaje figura 3.10 b. Entre más largo es el electrodo, mayor es el diámetro de su HI.

Para los cables enterrados horizontalmente, la figura 3.10.b presenta algunos valores estimados de la resistencia que pueda alcanzarse para variar longitudes y diámetros. En esta situación la resistencia es sensible a la distancia entre mayor es la misma menor resistencia y mayor contacto con el suelo. Si esta embebido a una profundidad de entre 1 a 2.5 m se logra mejores resultados.

Luego de los análisis efectuados, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- ▶ Claramente se ve que ρ es una magnitud variable y su valor disminuye principalmente por la influencia de la temperatura, humedad y contenido de sales solubles, tal como puede verse en los datos presentados en la fig 3.4 y 3.5. Los tres factores varían con el clima, época del año, naturaleza del suelo y la profundidad considerada.
- ▶ Cuanto menos es la resistividad, mejor resulta el terreno para la instalación de una toma de tierra. Por esta razón, el electrodo se entierra hasta una profundidad suficiente para encontrar un terreno húmedo y, por lo tanto buen conductor.
- ▶ El suelo dentro del Hemisferio de Interfase no puede ser considerado como una capa homogénea, en la realidad los suelos son heterogéneos y el camino aceptable para conocer su valor consistirá en realizar medidas en el área con la ayuda del método de Wenner.
- ▶ La resistencia de aterrizaje depende de la resistencia específica del suelo y de las dimensiones y disposiciones del electrodo. La longitud del electrodo tiene una importancia mayor que su sección.
- ▶ Se debe evitar que los electrodos de tierra se sitúen en la capa de congelamiento del terreno. Para ello, en áreas con peligro de heladas los

electrodos se enterrarán a una profundidad que no alcance esa temperatura. Para los suelos permanentes congelados (permafrost) es una situación específica que requiera en formas especiales de aterrizaje.

- ▶ Si se necesita disminuir los valores de ρ se puede realizar mejoras del suelo resulta conveniente tratar los suelos con carbón mineral, solución de agua con sal, etc.

Soluciones para la reducción de la resistencia del terreno.

En los casos donde los valores medidos comprueban que la ρ tiene un valor muy alto y no resulta fácil encontrar terreno adecuado en las proximidades de la instalación, se puede recurrir a las siguientes alternativas:

a) Mejoría de las resistencias del suelo con electrodos auxiliares.

- ▶ Aumento del número de electrodos: cuando la resistencia deseada no se puede alcanzar con una sola varilla, se debe clavar otra u otras conectadas en paralelo, lo que disminuye el valor de la “resistencia equivalente”. Entre más profunda se entierre la varilla, menor resistencia se obtendrá.

Sin embargo, el obtener valores de resistencia bajos, da como resultado que el número de picas a instalarse en un área de terreno aumente exponencialmente llegando a un punto de saturación (límite).

- ▶ Aumento de la longitud /diámetro de los electrodos: variando la longitud / diámetros es posible encontrar una combinación óptima para áreas áridas y suelos secos. Estas áreas deben ser tratadas con varillas más largas que penetren en el terreno hasta alcanzar capas más profundas, que normalmente presentan una más baja resistividad que las presentadas en las capas

superficiales. Cabe indicar que el diámetro del electrodo tiene poca influencia en la resistencia de aterrizaje, Comparando con su longitud.

b) Modificación de la composición química del terreno.

- Mejoramiento del suelo: es el proceso de cambiar una porción del suelo existente (de alta resistividad) con un suelo más conductivo. Para ser más efectivo este procedimiento el nuevo suelo se ubica alrededor del electrodo y dentro del Hemisferio de Interfase, A mayor porcentaje de suelo reemplazado, menor es la resistencia de aterrizaje que se logra.

En nuestro País se recomienda colocar Chocoto (tierra orgánica) o arcilla tipo benbonita para remplazar los suelos inmediatamente circundante al electrodo, cuya resistividad es aproximadamente de $2.5 \Omega\text{-m}$. Que es razonablemente conductiva dado su contenido mineral.

En otros casos los hoyos se rellenan con el producto denominado GAF (Chocoto), éste tiene una resistividad de $0.8 \Omega\text{-m}$ en la figura 3.11.a se muestra como se prepara el suelo para obtener una menor resistencia.

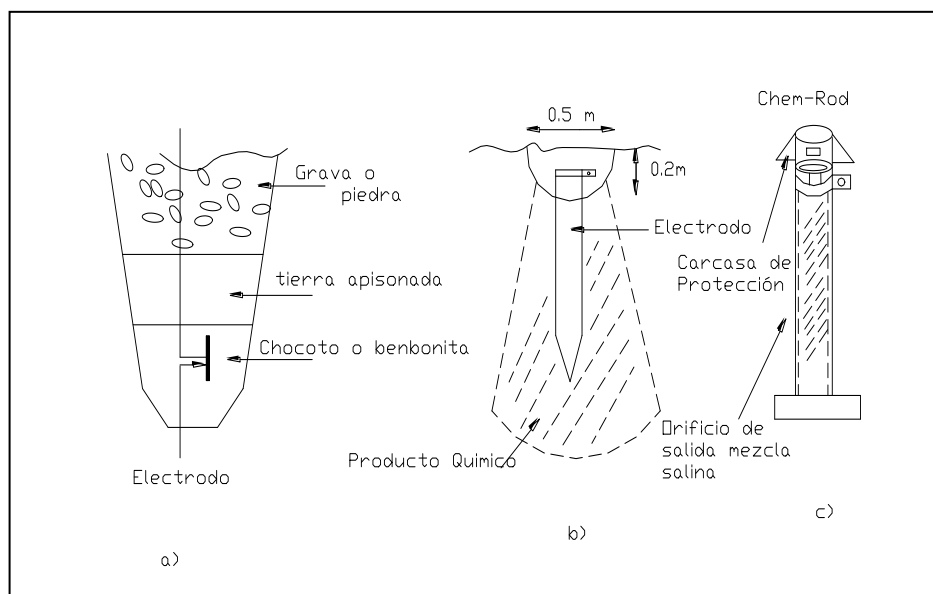


Fig 3.11 Preparación del suelo para el aterrizaje del electrodo

- ▶ Tratamiento químico con electrolito del terreno: la obtención de una buena resistencia de tierra siempre es un problema en suelo de pobre conductividad eléctrica. En estas situaciones críticas se recomienda la aplicación de elementos químicos para acondicionar el suelo contenido en el volumen Hemisferio de interfase a fin de disminuir la resistencia de contacto con la tierra.

El método (fig. 3.11.b) consiste en disolver en la humedad natural del terreno sustancias químicas (sulfato de magnesio, sulfato de cobre, cloruro de sodio) a partir de una cierta profundidad. Estas sales metálicas forman un electrolito alrededor del electrodo. La aplicación de estos productos se efectúan en una solución con agua y debido al carácter venenoso de una mezcla (en los dos Primeros), su manipulación debe efectuarse con mucho cuidado, evitando inhalar los vapores que salen de sus soluciones.

- ▶ Acondicionamiento automático del terreno a través de varillas químicas (Chem-Rod): Se trata de un tubo de cobre, con sales minerales que distribuyen a lo largo de la longitud del electrodo (Fig. 3.11.c). Las sales contenidas en el electrodo se filtran acondicionando químicamente un gran volumen de terreno; como resultado se logra la reducción en la resistividad del suelo siempre que hay suficiente humedad. Pero le toma tiempo (unas pocas semanas) para que las sales se disuelvan y se conduzcan a través del suelo dentro del hemisferio de interfase.

3.2.3. TIPOS DE TOMAS DE TIERRA

Toma de tierra Superficial: Son Varillas, barras o cables enterrados a una profundidad comprendida entre 0.5m y 1m, Cuya resistencia depende del

contenido en humedad de las capas superiores del terreno y puede estar dispuesta en forma radial, anular (bucle) o mallada.

La toma de tierra Radial debe poseer igual número de divisiones, el ángulo entre los dos radios contiguos, no debe ser menor a 60 grados, debido a que menores distancias no es recomendado por la interferencia mutua. También puede constituirse un excelente electrodo de toma de tierra un conductor que se cierra sobre si mismo para formar un bucle rectangular, circular (Fig. 3.12).

La red mallada de conductores enterrados es la más común, esta se compone de cable de cobre, desnudo de 50 mm² de sección (como mínimo), enterrado a una profundidad de 0.4 a 1 m o hasta que encuentre conductores de 2 a 6 m. La longitud del mayor lado de la superficie enmallada, no debe sobrepasar los 20m.

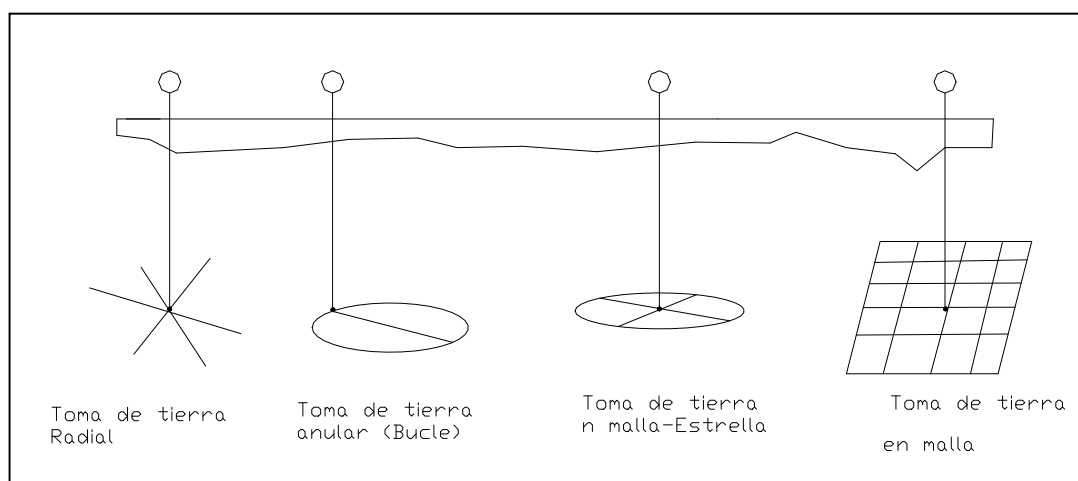


Fig. 3.12 Tomas de tierra

Tomas de tierra Verticales: Son picas hincadas en el terreno verticalmente a una profundidad no menor a los 2 m, es posible alcanzar mayores profundidades, empalmado una a continuación de otra, lo que requerirá de andamios para el hincado

Las tomas verticales se realizan a partir de tubos, varillas, barras u otros perfiles de acero. La longitud y el número necesario de estas dependen de la resistencia de tierra deseada.

Sin embargo, para mantener dentro de los límites aceptables la influencia eléctrica que mutuamente puedan ejercer dos electrodos contiguos es recomendable mantener una separación mínima a dos veces la longitud del electrodo y en electrodos de plancha o placa, dicha distancia no será menor al triple de la dimensión máxima de la placa (unos 3 m).

Los electrodos de plancha se recomiendan solamente cuando la resistividad del suelo es reducida (tierra vegetal) y de profundidad considerable. Estos electrodos se introducen en forma vertical u/o horizontal en la tierra, generalmente se utiliza placas de 0.5 x 1 m; o 1 x 1 m, ya sea de cobre o acero. El canto superior de la tierra, como mínimo.

Se recomienda que los electrodos deben enterrarse en lugares no expuestos a las heladas y que no lleguen a acercarse totalmente, ya que por esta causa la resistencia puede variar notablemente.

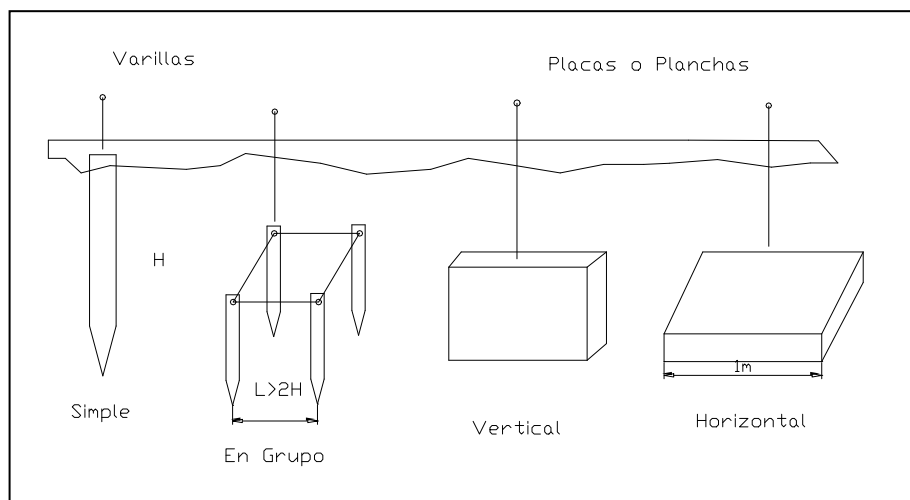


Fig. 3.13. Tomas Verticales.

Tomas de Tierras Naturales: Son aquellas piezas metálicas en contacto con la tierra o a través del hormigón, cuya finalidad original no era la de una puesta a tierra, pero que se utiliza como tal. Como toma de tierra naturales se puede utilizar:

- Armaduras metálicas de hormigón en el terreno.
- Envoltura metálica de cables de telecomunicaciones subterráneos. Este método de puesta a tierra no es recomendable; si no, como una solución temporal y en todo caso se debe realizar un chequeo y medición para asegurar que existe continuidad.
- Red de tubería metálica de la conducción de agua.
- Otras partes estructurales subterráneas apropiadas tales como columna, piezas metálicas del edificio, etc.

Las tomas de tierras tanto naturales como artificiales pueden ser:

Sencillas: si son constituidas por un solo electrodo.

Múltiples: Si son realizadas por la unión de más de las dos tomas simples y de diferente tipo.

En la práctica, las formas más comunes de realizar un sistema de puesta a tierra son: Varilla sencilla, múltiples varillas, malla, combinación malla varilla. La aplicación de uno de estos depende de los criterios adoptados por el proyectista. En sistemas eléctricos de potencia la composición más usada es una variante del sistema malla, malla-varilla para obtener una resistencia de tierra que se encuentre alrededor de los 5 ohmios.

Recomendaciones sobre los elementos que constituyen las instalaciones de Puesta a tierra.

Líneas de tierra: dentro de las recomendaciones que se encuentran en las siguientes:

- Las líneas de tierra tendrán una resistencia mecánica adecuada y estarán protegidos contra la corrosión. Así, los metales más utilizados son el cobre y el acero galvanizado, todos ellos resisten a la corrosión.
- Su sección será tal, que la máxima corriente de defecto que pueda producirse en cualquier punto de la instalación no lleve estos conductores a una temperatura cercana a la de fusión, ni poner en peligro los empalmes o conexiones. De cualquier forma, la sección mínima será de 250 mm² para el cobre y 500 mm² para el acero. El recorrido de los conductores de las líneas de tierra será lo mas corto posible, evitando trazados bruscos y curvas de poco radio. De forma general, se recomienda que sea conductores desnudos instalados al exterior de forma visible.
- En las líneas de tierras están prohibido intercalar interruptores fusibles, etc. Solamente se permiten un dispositivo de corte en los puntos de puesta a tierra, de forma que permitan medir la resistencia de la puesta a tierra, cuando esta operación sea necesaria.
- En la red de conexiones de los elementos constitutivos de la p.a.t. no debe existir la posibilidad de interrumpir la continuidad de las líneas de tierra.

Tomas de Tierra: Se puede señalar las siguientes recomendaciones:

- Las tomas de tierra estarán formadas por materiales metálicos en forma de varillas, cables, chapas, que presenten una resistencia elevada a la corrosión, tales como el cobre y el acero protegidos debidamente.
- Las secciones mínimas de los electrodos que se fabriquen se ajustarán a las especificaciones siguientes.

Las picas son electrodos que se fabrican de:

Cobre o acero recubierto de cobre, no será de un diámetro inferior a 14 mm. Los de acero sin recubrir no tendrán un diámetro inferior a 20 mm.

Los tubos de acero con recubrimiento de zinc no serán de un diámetro inferior a 30 mm, ni de espesor de la pared inferior a 3 mm. Los conductores enterrados pueden estar constituidos en forma de varilla, cable o pletina, deberán tener una sección de 250 mm² como mínimo para el cobre y 500 mm² para el acero. Esta prohibido el uso de cables formado por alambres menores de 2 mm de diámetro los de cobre y 3 mm los de acero.

c) Para las planchas o placas o chapas enterradas se establece que si es cobre tendrán un espesor mínimo de 2 mm y si son de acero habrá de ser de 3 mm. En todos los casos, la superficie total de las palcas ha de ser, como mínimo de 0.5 m². A continuación se recopilan todos estos valores en la figura 3.14.

| TIPOS ELECTROD | | REPRESENTACIÓN | Naturaleza diámetro, espesor, sección d (mm) e (mm) s (mm ²) | | | |
|------------------------|----------------------|----------------|---|-------|-------|--------|
| PICAS | VARILLAS □ BARRAS | | Cobre y Acero | >14 | - | 154 |
| | TUBOS | | Acero sin recubrir | >20 | - | 314 |
| | | | - | >30 | >3 | 254 |
| Conductores Enterrados | VARILLAS □ BARRAS | | Cobre | >8 | - | - |
| | CABLE | | Acero | >11.3 | - | - |
| | PLETINA | | Cobre | >2 | - | >100Ac |
| | | | Acero | >3 | >2 | - |
| PALCAS □ CHAPAS | | Cobre | - | >2 | >25Cu | |
| | | Acero | - | >3 | >50Ac | |

Fig. 3.14 sección mínimas para los electrodos.

3.3. CLASIFICACIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA.

Por lo general las normas internacionales dividen a las puestas a tierras en diferentes clases siguientes:

3.3.1. PUESTAS A TIERRA DE FUNCIONAMIENTO U OPERACIÓN

Partiendo de la base que es necesario establecer una conexión a tierra en determinados puntos de una instalación eléctrica con el fin de mejorar el funcionamiento, una mayor seguridad o una mejor regularidad de operación, estos puntos del sistema por conectar a tierra puede ser por ejemplo la conexión a tierra de los neutros de los generadores de los transformadores en los devanados conectados en estrella, la conexión a tierra de los pararrayos de los hilos de guarda, de los transformadores de potencial y algunos otros, es decir que cuando existe un desbalance en las corrientes de cada una de las fases entonces la corriente resultante tiene que retornar por alguna parte y lo hace por el neutro el mismo que esta puesto solidamente, o mediante una impedancia a tierra, ver Figura 3.15 lo cual nos sirve para estabilizar el sistema y no exista variaciones de tensión.

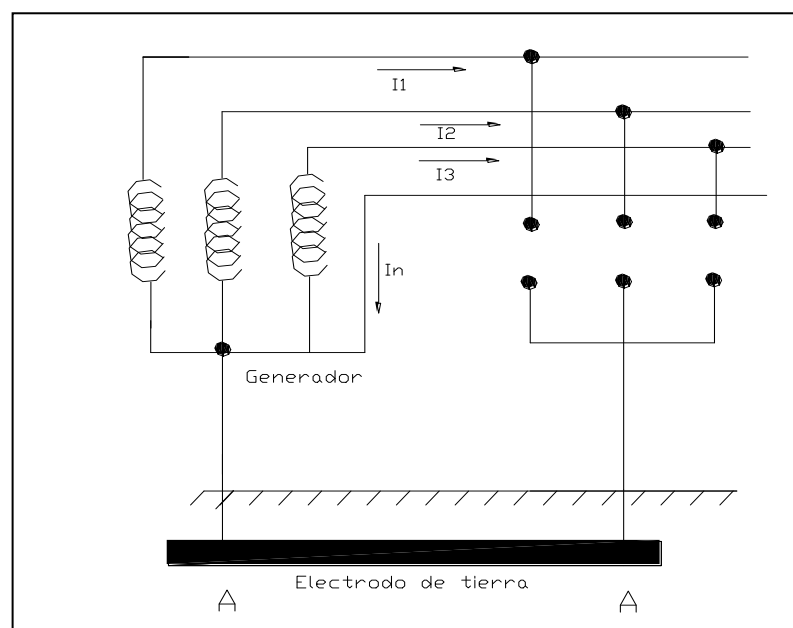


Fig. 3.15 Puesta a tierra de operación

En los sistemas eléctricos de potencia se puede tener varias formas de poner a tierra los neutros de los generadores, transformadores podemos tener algunas configuraciones como son:

Neutro del sistema aislado.

Las ventajas que se atribuyen a este sistema son, que la falla a tierra de una fase puede tolerarse sin desconexión del sistema y que reduce el peligro de choque shock eléctrico, algunas industrias usan estos sistemas a niveles de 6.0 KV.

El éxito a sido bueno pero queda latente de que la posibilidad de que los sobrevoltaje debidos a la resonancia o fallas intermitentes, estos sobre voltajes pueden causar un amplio daño. Se puede instalar indicadores de falla a tierra. Pero la localización de una falla monofásica requiere la desconexión del circuito, con la consiguiente perdida de tiempo. Una segunda falla es difícil de localizar.

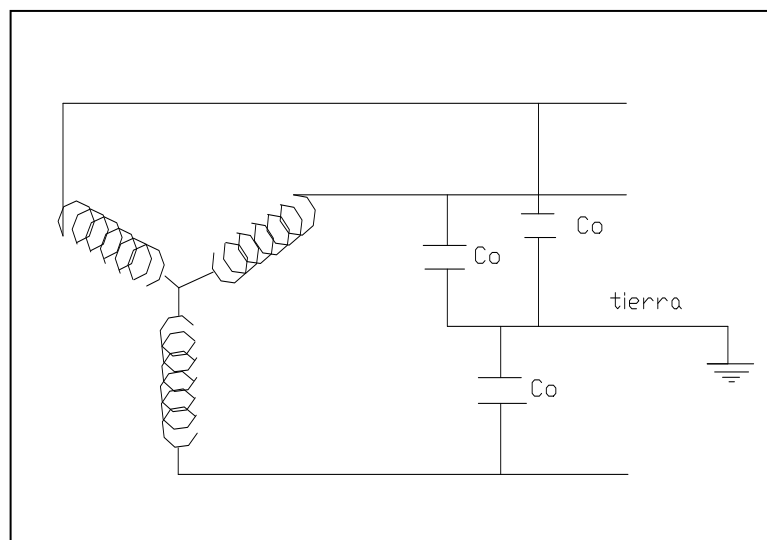


Fig. 3.16 Neutro del Sistema aislado.

Neutro solidamente puesto a tierra.

Este sistema requerirá menor aislamiento cerca del neutro (que uno aislado de tierra) y los desplazamientos de las fases relativas al “neutro – tierra” Son mucho menos probables. Esto es importante sobre todo en sistemas de muy alto voltaje, medios y bajos voltajes, Este sistema produce altas corrientes de falla y por lo tanto no es favorecido, la ventaja de este sistema es que se puede tener dos o mas niveles de voltajes de un mismo generador o transformador. Ver figura 3.16

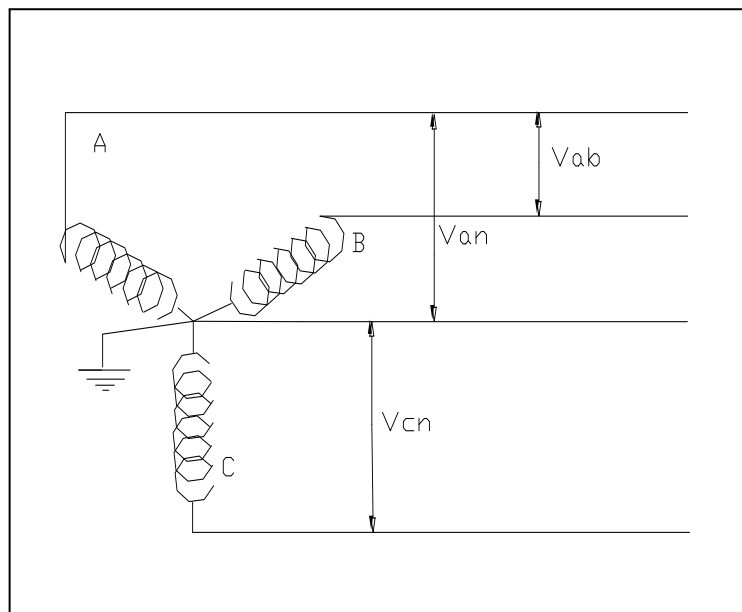


Fig. 3.17 Sistema con Nutro solidamente puesta a tierra.

Neutro puesto a tierra a través de una resistencia.

Una resistencia de un valor suficientemente bajo puede eliminar las fallas intermitentes y muchos casos de resonancia y al mismo tiempo limitan la magnitud de la corriente de falla a valores seguros para las maquinas. Usualmente se selecciona una resistencia que de una corriente similar a la corriente de plena carga. En este caso, sin embargo hay el peligro de fallas de hasta el 10% del devanado de generadores cerca del neutro que pudieran no ser detectadas y que dañarían la maquina.

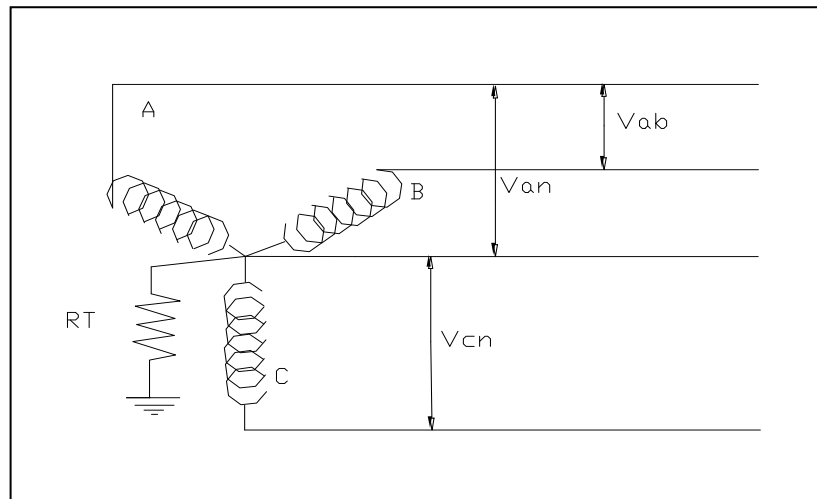


Fig. 3.18 Sistema puesto a tierra a través de una resistencia.

Neutro puesto a tierra a través de una reactancia.

Se usan en lugar de resistencias, pero tiene la desventaja de producir amortiguamiento. Debido al aumento de la impedancia con la frecuencia el sistema es más efectivo para suprimir corrientes armónicas.

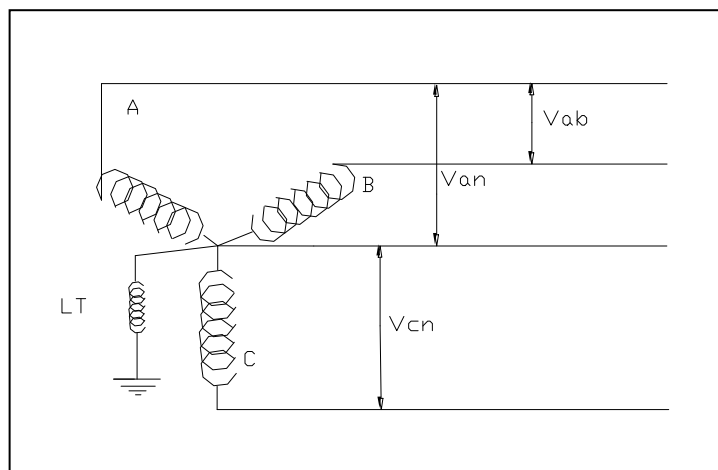


Fig. 3.19 Sistema Puesto a tierra a través de una reactancia

El sistema eléctrico de potencia de los equipos de perforación la compañía, al ser un equipo móvil que constantemente se están moviéndose en varios sitios del oriente Ecuatoriano está diseñados o tienen sus neutros de los generadores, transformadores aislados o flotantes, puesto que la mayor parte de la carga son motores de corriente directa, el mismo que es suministrado por los generadores de AC pasando por los elementos estáticos de conversión como son los SCRs.

3.3.2. PUESTAS A TIERRA PARA PROTECCIÓN

Partiendo de la base de que es necesario conectar eléctricamente al suelo todas aquellas partes de las instalaciones eléctricas que no se encuentran a tensión normalmente, pero que pueden tener diferencias de potenciales a causa de fallas accidentales, tales partes pueden ser: los tableros eléctricos, carcasas de las maquinas eléctricas y en todas las estructuras metálicas.

El presente estudio es precisamente para determinar las condiciones actuales de las puestas a tierra de protección y mejorar las condiciones actuales, ya que el sistema eléctrico de potencia de los equipos de perforación (ver plano del SEP apéndice A) en cual el sistema esta diseñado para trabajar con neutro flotante o neutro aislado, para no tener problemas de estabilidad del sistema en el momento que exista desbalance de corrientes.

Todas las estructuras metálicas estén o no en contacto con la energía eléctrica debemos poner a un nivel de potencial de la tierra que es de cero, Todos los elementos, equipos de la compañía como: motores, generadores, transformadores,

tanques de combustibles, casetas del SCR están montadas sobre un Skid los cuales están puestos a tierra en forma individual ver anexo A.

3.3.3. PUESTA A TIERRA PARA TRABAJO

Con frecuencia durante las actividades de trabajo en una instalación eléctrica como son mantenimiento, ampliaciones, reparaciones, etc. Es necesario es necesario realizar conexiones a tierra temporales con partes de la instalación puesta fuera de servicio con el fin de que sea accesible sin peligro para los trabajos a realizar, en cualquier de los casos de puesta a tierra mencionados anteriormente no se deben exceder las “Tensiones de Seguridad” establecidos más adelante.

3.4. PARTES QUE COMPREDEN LAS PUESTAS A TIERRA DE PROTECCIÓN

Todo sistema de puesta a tierra constará de las siguientes partes:

- Tomas de tierra.
- Líneas principales de tierra.
- Derivaciones de las líneas principales de tierra.
- Conductores de protección.

El conjunto de conductores, así como sus derivaciones y empalmes, que forman las diferentes partes de las puestas a tierra, constituyen el circuito de puesta a tierra.

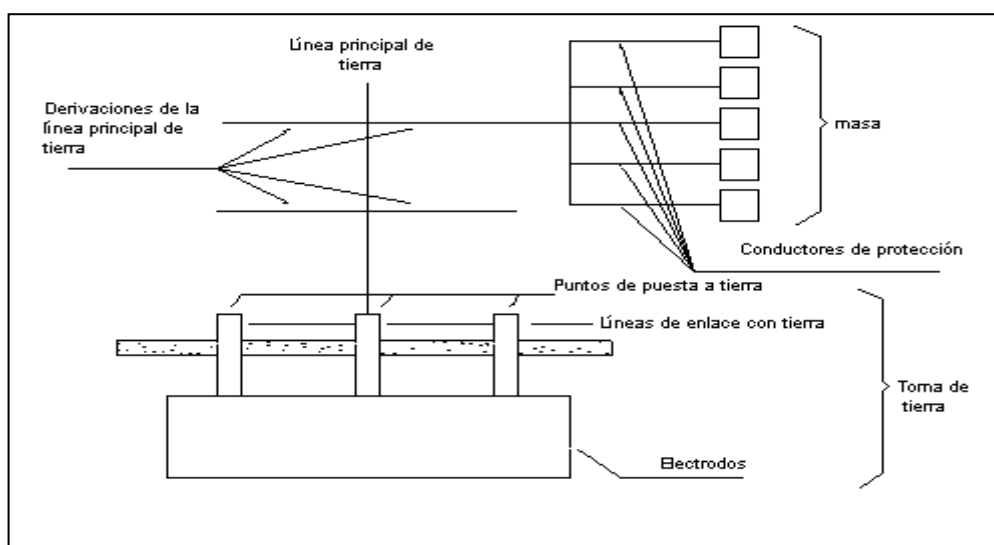


FIG. 3.20. Partes que comprenden la tierra.

1. Tomas de tierra.

Las tomas de tierra estarán constituidas por los elementos siguientes:

- ▶ Electrodo. Es una masa metálica, permanentemente en buen contacto con el terreno para facilitar el paso a éste de las corrientes de defecto que puedan presentarse o la carga eléctrica que tenga o pueda tener.
- ▶ Línea de enlace con tierra. Está formada por los conductores que unen el electrodo o conjunto de electrodos con el punto de puesta a tierra.
- ▶ Punto de puesta a tierra es un punto situado fuera del suelo que sirve de unión entre la línea de enlace con tierra y la línea principal de tierra.

Las instalaciones que lo precisen, dispondrán de un número suficiente de puntos de puesta a tierra, convenientemente distribuidos, que estarán conectados al mismo electrodo o conjunto de electrodos.

El punto de puesta a tierra estará constituido por un dispositivo de conexión (regleta, placa, borne, etc.) que permita la unión entre los conductores de las líneas de enlace y principal de tierra de forma que pueda, mediante útiles apropiados, separarse éstas, con el fin de poder realizar la medida de la resistencia de tierra

2. Líneas principales de tierra.

Las líneas principales de tierra estarán formadas por conductores que partirán del punto de puesta a tierra y a las cuales estarán conectadas las derivaciones necesarias para la puesta a tierra de las masas generalmente a través de los conductores de protección.

3. Derivaciones de las líneas principales de tierra

Las derivaciones de las líneas de tierra estarán constituidas por conductores que unirán la línea principal de tierra con los conductores de protección o directamente con las masas.

4. Conductores de protección

Los conductores de protección sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar la protección contra los contactos indirectos.

En el circuito de puesta a tierra, los conductores de protección unirán las masas a la línea principal de tierra.

En otros casos reciben igualmente el nombre de conductores de protección, aquellos conductores que unen las masas:

- al neutro de la red.
- a otras masas.
- a elementos metálicos distintos de las masas.

Los circuitos de puesta a tierra formarán una línea eléctricamente continua en la que no podrán incluirse en serie ni masas ni elementos metálicos, cualquiera que sean estos. Siempre la conexión de las masas y los elementos metálicos al circuito de puesta a tierra, se efectuará por derivaciones desde éste.

Los electrodos pueden ser artificiales o naturales. Se entiende por electrodos artificiales los establecidos con el exclusivo objeto de obtener la puesta a tierra, y por electrodos naturales las masas metálicas que puedan existir enterradas. Para las puestas a tierra se emplearan principalmente electrodos artificiales. No obstante los electrodos naturales que existirán en la zona de una instalación y que presenten y aseguren un buen contacto permanente con el terreno, pueden utilizarse bien solos o conjuntamente con otros electrodos artificiales.

En general, se puede prescindir de éstos cuando su instalación presente serias dificultades y cuando los electrodos naturales cumplan los requisitos anteriormente señalados con sección suficiente y la resistencia de tierra que se obtenga con los mismos presente un valor adecuado.

3.5. DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE DE TOQUE Y DE PASO.

La seguridad de una instalación eléctrica desde los criterios de diseño hasta su puesta en utilización es materia fundamental para evitar accidentes ocasionados por la electricidad es así que nace la inquietud de investigar este tema definiendo los fenómenos que producen el contacto accidentalidad con la corriente eléctrica y definir como prevenirlos, evitando accidentes, muchos de los cuales han causado la muerte en pocos segundos.

Una persona se electriza cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo, es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La electrocución se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo.

Cuando una corriente eléctrica DC o AC de baja frecuencia es inyectada en un sistema de puesta a tierra, la corriente fluye por todos los conductores y pasa a la tierra a lo largo de la superficie de ellos. Dicha corriente encuentra una resistencia, la cual depende principalmente de la resistividad del suelo. Debido al efecto de una corriente fluyendo a través de una resistencia, el sistema de puesta a tierra y todas las estructuras metálicas conectadas a él se elevarán de potencial con respecto a un punto remoto.

Esta elevación de potencial puede producir sobre la superficie del terreno gradientes de potencial que pueden resultar peligrosos para las personas. Por esto se hace necesario el análisis de algunas tensiones sobre la superficie del terreno.

Tolerancia del cuerpo humano a la corriente eléctrica.

Los tres elementos que influyen en los límites de corriente que es tolerada por el cuerpo humano son: La frecuencia, la magnitud y la duración de la corriente a través de áreas vitales del cuerpo.

Las referencias que se indican más adelante se refieren a corrientes de 50 y 60 Hz, pudiendo el cuerpo tolerar valores mayores o menor frecuencia. Sin embargo de que una corriente oscilatoria es más peligrosa.

La magnitud a la que percibe la corriente es el orden de un miliamperio. Corrientes mayores del orden de 9 a 25 mA, puede ser muy dolorosa y puede originar la pérdida del control muscular haciendo difícil o imposible liberar un objeto energizado sostenido por una mano. Corrientes mayores producen contracciones musculares que dificultan la respiración. En este caso los efectos no son permanentes y desaparecen al interrumpir la corriente, a menos que las contracciones sean muy severas y se hayan interrumpido la respiración por varias minutos, aún entonces el cuerpo responde a los primeros auxilios.

A mayores valores de corriente, del orden de 50 mA o más, puede sobrevenir la muerte por fibrilación ventricular; en estos casos los primeros auxilios son pocos efectivos y una atención especializada rara vez se la obtiene en el corto lapso en que ésta es todavía efectiva. Se ha reportado que en algunos casos los primeros auxilios dieron resultados positivos.

En cuanto a la duración de la corriente, Dalziel indica que el 99% de las personas pueden soportar, sin sufrir fibrilación ventricular, corrientes determinadas según la ecuación.

$$I^2 k \times t = 0.0135$$

$$\text{Entonces: } I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (3.7)$$

En donde:

I_k = corriente eficaz a través del cuerpo, o corriente tolerable por el cuerpo humano (A).

t = tiempo de duración del choque (s).

0.0135 = Valor empíricamente obtenido, conocido como “Constante de Energía”.

Esta ecuación es válida según pruebas de hasta 3 segundos de duración. De los valores obtenidos, Dalziel trabajando en lado seguro, no recomienda valores mayores a los 9mA para los hombres y 6 mA para las mujeres, como límites para casos en donde un choque eléctrico puede persistir por unos pocos minutos.

La diferencia de potencial entre una mano y los dos pies se conoce como “potencial de toque” y la que se representa entre los pies como “potencial de paso” en las figuras 3.21 y 3.22 muestran estos dos potenciales así como los circuitos equivalentes.

En ambos casos, el contacto al alcance de la mano o entre ambos pies se lo considera a un metro de distancia o separación. Cuando el contacto está más allá de este límite, la diferencia de voltaje alcanzada se lo conoce como “potencial transferido”. Este caso se lo representa en la figura 3.23, junto con el circuito equivalente.

En los circuitos equivalentes incluyen la resistencia del electrodo de tierra del sistema ($R_1 + R_2 + R_o$) en la figura 3.21; $R_1 + R_o$ en la figura 3.22; y R_o en la figura 3.23.

- ▶ La resistencia de contacto de una mano (para contacto de toque).
- ▶ La resistencia de los zapatos.
- ▶ La resistencia R_f de la tierra inmediata debajo de cada pie.
- ▶ La resistencia del cuerpo R_k .

La resistencia del contacto de la mano puede ser muy baja y por lo tanto se asume su valor igual a cero, la resistencia de los zapatos mojados es un valor también incierto, y para la piel también será muy pequeña y por lo tanto igual a cero.

La resistencia de la tierra por debajo de los pies, puede afectar apreciablemente en el valor de la corriente eléctrica en el cuerpo y de hecho puede ser más útil en situaciones difíciles.

Los pies pueden ser considerados como un electrodo con una superficie equivalente a una circunferencia con un radio de 200 milímetros. Y la resistencia de tierra puede ser calculada en términos de resistividad de la superficie (ρ_s) en ohmio-metros, que generalmente es de material de grava que tiene una alta resistividad generalmente de 1000 a 3000 ohmio-metros que sirve para disminuir el peligro de los gradientes de potencial. Esto ha sido determinado la resistencia

de dos pies en serie (voltaje de paso) es aproximadamente **6ps** ohmios, y la resistencia de dos pies en paralelo (Voltaje de toque) de **1.5ps** ohmios, esto es R_F en ohmios para cada pie puede asumirse igual a **3ps**.

La resistencia R_k del cuerpo, tomada en el lado seguro tiene un valor aproximado de 1000Ω . Con estos datos y la ecuación de corriente tolerable, se puede establecer los potenciales tolerables de paso E_s y de toque E_D que se deducirán a continuación. El valor a sido establecido por la practica en $150V$, que desacuerdo a las ecuaciones anteriores es un valor adecuado para una duración de choque eléctrico no mayor a 1.2 segundos. Un voltaje de valor tan bajo puede ser difícil de conseguirlo a costos apropiados, entonces un rápido despeje de falla debe considerarse como una alternativa apropiada a costos razonables.

Tensión de toque o de contacto (E_D).

La tensión a la cual se puede ver sometido el cuerpo humano por contacto con una carcasa o estructura metálica que normalmente no esta a en tensión de una máquina o como se sabe una corriente eléctrica que circula por el cuerpo humano puede producir un efecto mas o menos grave e inclusive la muerte según sea su intensidad y duración, su naturaleza y las condiciones en que se encuentren las personas afectadas.

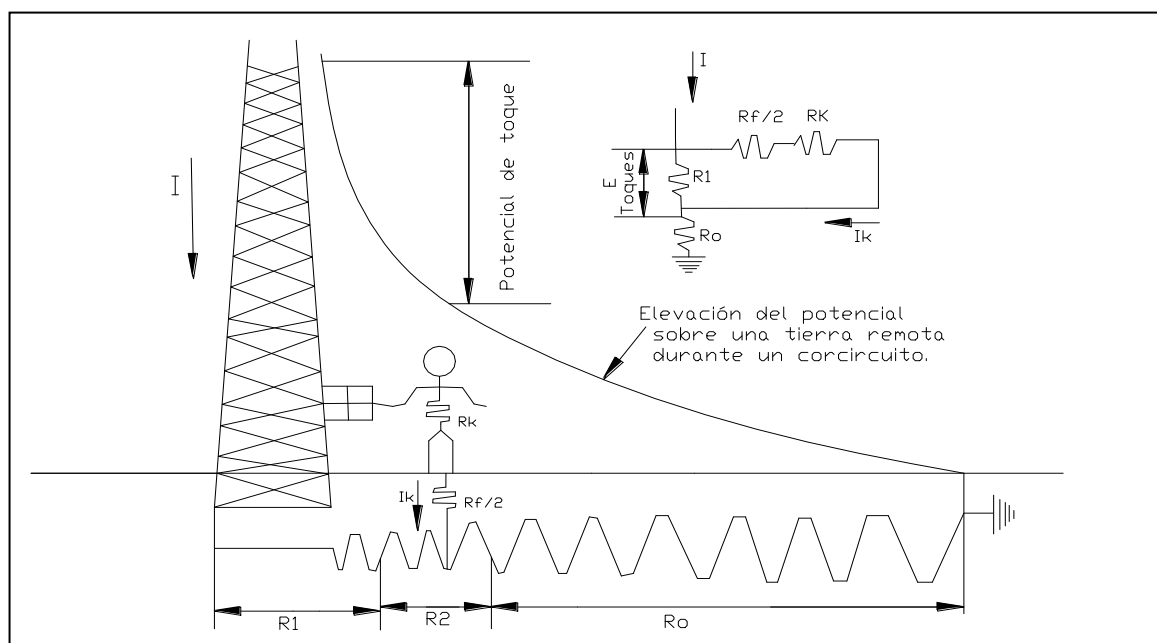


FIG. 3.21. Potencial de contacto cerca de una estructura conectada a tierra.

En la figura 3.21 muestra el circuito equivalente del voltaje de toque o contacto “mano a dos pies”. Aquí el problema es algo más complejo, si el objeto tocado está inmediatamente aterrado, el máximo diferencial de potencial interceptado podría ser que ocurra sobre una distancia de la superficie de la tierra.

Reemplazando las variables de los circuitos y utilizando la ecuación 3.7 de la corriente se tiene el voltaje de toque (E_D)

$$E_D = (R_k + R_F/2) \times I_k$$

Reemplazando tanto la resistencia como la corriente nos queda.

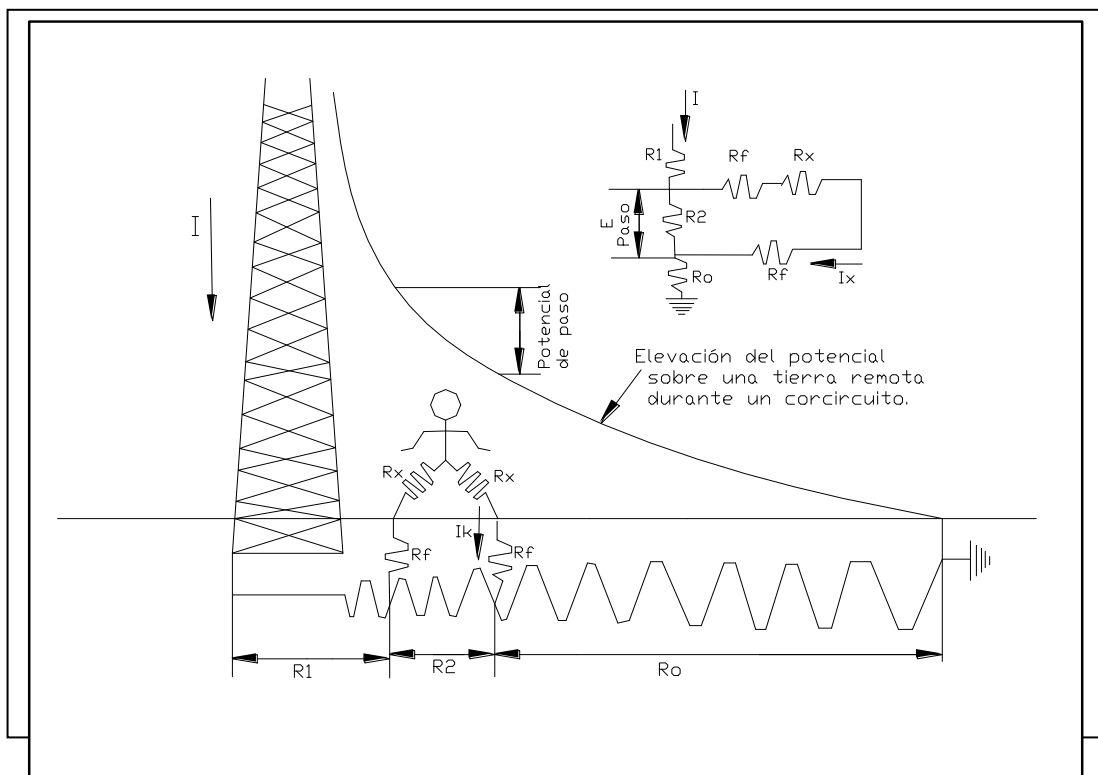
$$E_D = (1000 + 1.5\rho_s) \times 0.116/\sqrt{t}.$$

$$E_D = (116 + 0,174\rho_s) / \sqrt{t}. \quad (3.8)$$

Donde ρ_s resistividad de la superficie (grava) está en el orden de 2500 a 3000 Ω -m

Tensión de paso (E_s).

Se define como la tensión que durante el funcionamiento de la red de tierra puede resultar entre el pie de una persona apoyada en el suelo a una distancia de un metro (1 paso) o entre un pie y el otro en forma convencional.



En la figura 3.22 muestra el circuito equivalente de un voltaje de paso o “pie a pie”. Aquí el diferencial de potencial puesto en paralelo por el cuerpo está limitado al valor máximo entre dos puntos accesibles sobre la tierra separados por una distancia de un paso, el cual se asume un paso.

Reemplazando las variables de los circuitos y utilizando la ecuación 3.2 de la corriente se tiene el voltaje de paso E_s .

$$E_s = (R_k + 2R_f) \times I_k$$

Remplazando tanto la resistencia como la corriente nos queda.

$$E_s = (1000 + 6ps) \times 0.116/\sqrt{t}.$$

$$E_s = (116 + 0.7ps) / \sqrt{t}. \quad (3.9)$$

Transferencia de potencial.

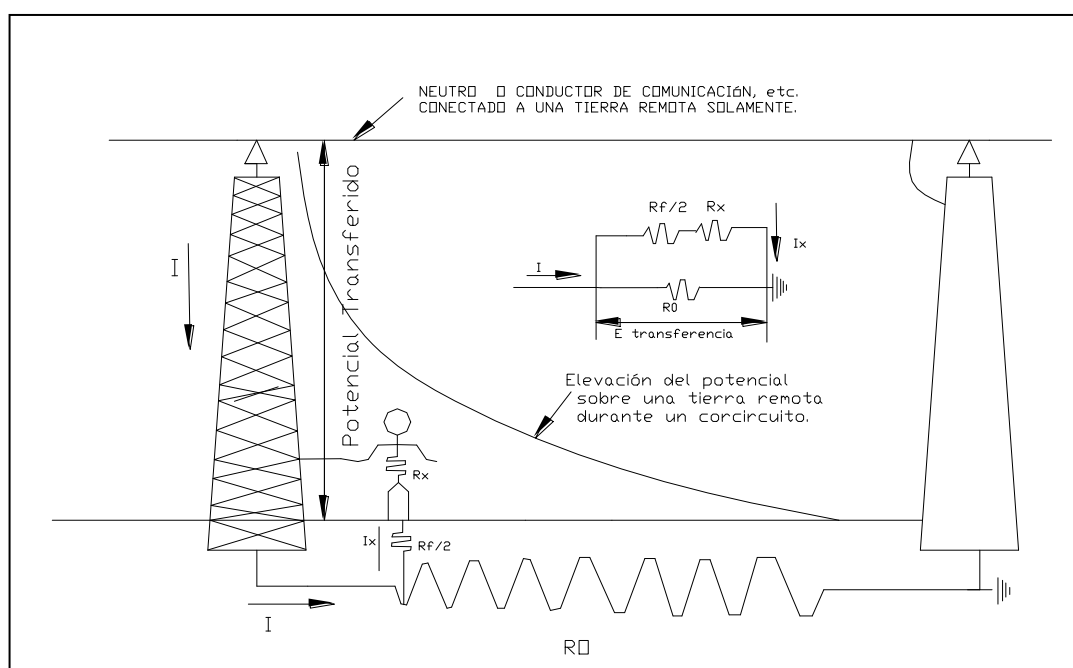


FIG. 3.23. Ejemplo de peligro debido a un potencial transferido

En la figura 3.23 muestra un ejemplo de transferencia de potencial el cual puede ser considerado como un caso especial de voltaje de toque o contacto.

Una persona estando dentro de un área o estación toca un conductor aterrado a un punto remoto; o estando una persona en un punto remoto toca un conductor conectado a la estación de la malla a tierra. Aquí el choque de voltaje puede ser esencialmente igual a toda la elevación del potencial de la malla de tierra bajo condiciones de falla.

CAPITULO IV

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA.

4.1 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.

Antes de realizar un diseño de un electrodo de puesta a tierra debemos conocer el plano físico y eléctrico de la estación o subestación. Un electrodo de puesta a tierra ideal sería que la resistencia sea cero, esto se lograría con una placa de cobre que cubra toda la estación, pero esto no es posible en subestaciones de gran tamaño por las condiciones, económicas, ambientales y de construcción.

Por lo que generalmente un electrodo de sistemas de puesta a tierra pueden ser: Simple Varilla, varias varillas conectadas en paralelo, malla y una combinación de malla varilla, etc.

Además de estas configuraciones se tiene otras configuraciones de electrodos de puesta a tierra Ver Figura 3.12. 3.13, los mismos que no son tan utilizados en estaciones o subestaciones de gran magnitud, donde la corriente de falla es tremendamente grande.

4.2. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA VARILLA SENCILLA.

Es la solución más económica, pues proporciona una mejor disipación de las corrientes de falla. Sin embargo este proporciona un “ embudo de tensión “ que provocan gradientes de potencial de toque o de paso peligrosos.

El potencial eléctrico en el plano simétrico de una varilla sencilla depende de únicamente de tres factores: resistividad de la tierra (ρ), flujo de la corriente de falla (I) dentro de una varilla, longitud (l) de la varilla enterrada Ver figura 4.1

A fin de disminuir esta tensión se recurre a los electrodos de gradación de potencial (toma de tierra anulares) conectados a la toma de tierra principal, esto da como resultado un acoplamiento considerable del embudo.

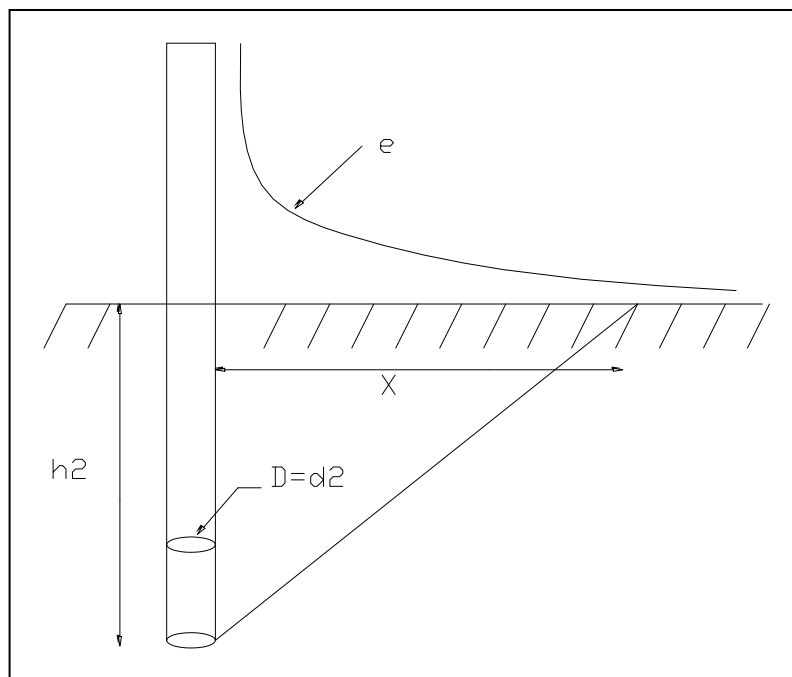


Fig 4.1 Gradiente de potencial en una varilla.

Para calcular la resistencia de una varilla de puesta a tierra podemos determinar con la ecuación 4.1.

$$R_v = \left| \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \right| \times \left| \ln\left(\frac{4 \cdot h^2}{d^2}\right) - 1 \right| \quad (4.1)$$

Donde: h^2 longitud enterrada la varilla.

d^2 diámetro de la varilla.

El potencial en una varilla es:

$$V = \frac{\rho \times I}{2 \cdot \pi \cdot x^2} \quad (4.2)$$

X es la distancia de separación entre la varilla y otro punto remoto.

4.3. PUESTA A TIERRA CON MÚLTIPLES ELECTRODOS.

Frecuentemente son usados múltiples electrodos conectados en paralelo para disminuir la resistencia de puesta a tierra y para disminuir los gradientes de potencial.

$$R_{nv} = \left| \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot h^2} \right| \times \left| \ln\left(\frac{8h^2}{d^2}\right) - 1 \right| + \left| \frac{2 \cdot K_1 \cdot h^2}{\sqrt{a}} \right| \times \left| \sqrt{(n) - 1} \right|^2 \quad (4.3)$$

n es el número de electrodos de puesta a tierra.

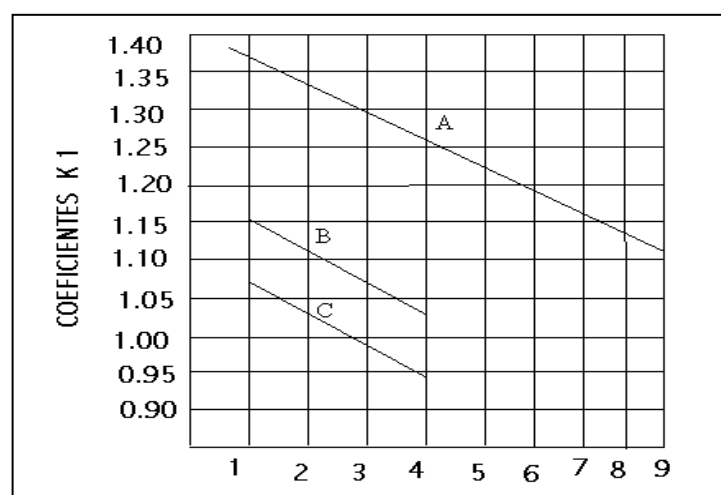
a = área cubierta por las varillas

K_1, K_2 Coeficientes dados por la figura 4.2

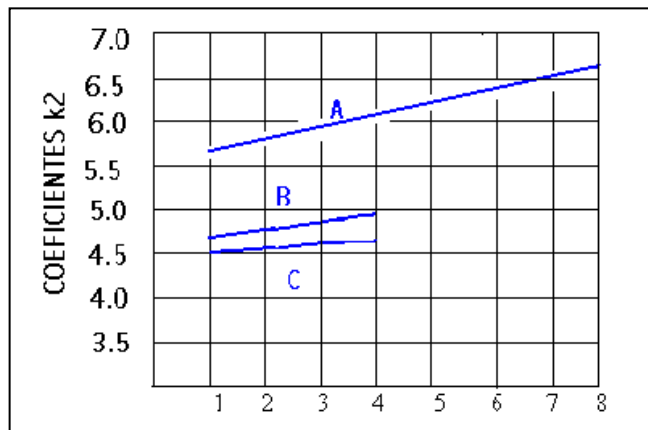
Para calcular más fácilmente podemos determinar basándose en la ecuación 4.4

$$R_{nv} = \frac{R_v \cdot k}{n} \quad (4.4)$$

K se puede determinar basándose en la figura 4.3.



LONGITUD / ANCHO = X



Curva A
para Prof. $h = 0$

Curva B.
Para $h = 1/10 \sqrt{\text{Área}}$

Curva C.
Para $h = 1/6 \sqrt{\text{Área}}$

LONGITUD / ANCHO = X

FIG: 4.2 Coeficientes K1 Y K2

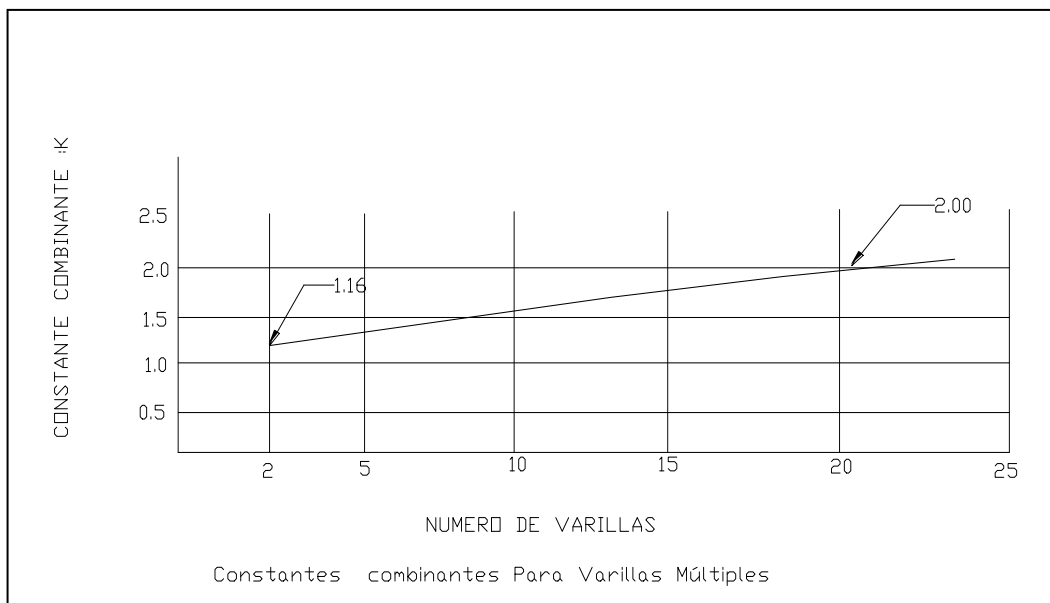


Fig. 4.3 Coeficiente de K

La forma más utilizada de utilizar los electrodos de puesta a tierra conectados en paralelo es con tres electrodos conectados en triángulo. Ver figura 4.4

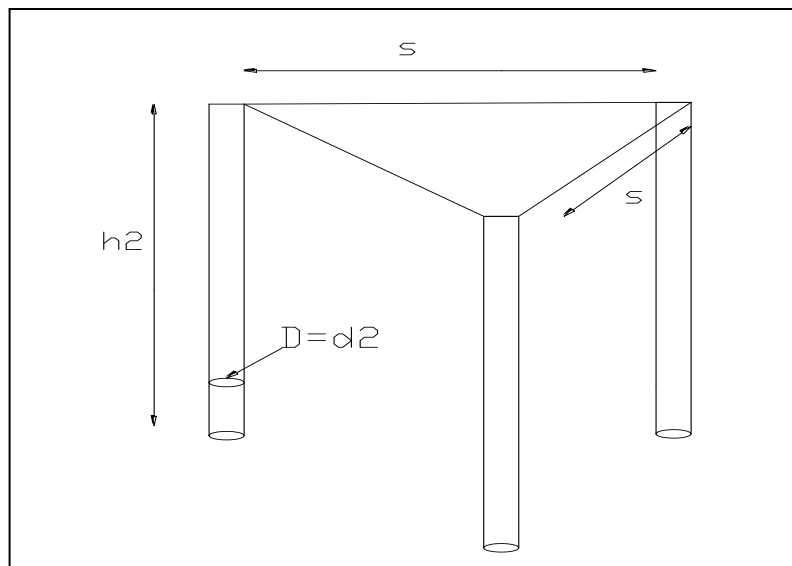


Fig. 4.4 Electrodos conectados en triángulo.

Los valores de S que es la separación entre electrodos, por lo general los valores de S deben estar separados entre 1.2 la longitud h2 para que no existan interferencias en sus hemisferios de interfase HI. Para calcular el valor de resistencia podemos determinar con la siguiente ecuación.

$$R = \left| \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot h_2} \right| \times \left| \ln\left(\frac{2 \cdot h_2}{A}\right) \right| \quad (4.5).$$

Donde: A es la distancia media geométrica ver figura 4.5

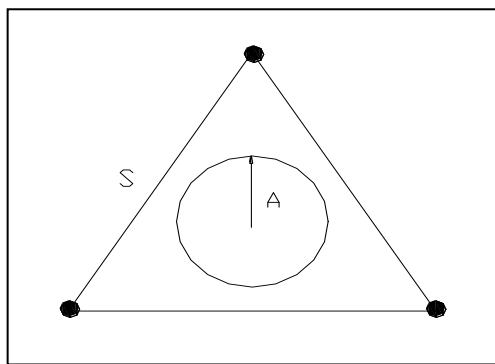


Fig. 4.5 Distancia media geométrica del triángulo.

Para calcular el valor de A podemos determinar con la ecuación siguiente.

$$A = 3 \sqrt{(d^2/2 \times S^2)} \quad (4.6)$$

4.4. VARILLAS QUÍMICAS

En lugares donde el espacio disponible es limitado y la resistividad del suelo no puede reducirse, la opción es acondicionar el terreno mediante el uso de electrodos activos (CHEM_ROD), los cuales proveen una resistencia de tierra más baja. A diferencia de los otros sistemas de puesta a tierra, la varilla activa, acondiciona químicamente en forma continua un gran volumen de terreno. La determinación del valor de la resistencia a tierra de estos arreglos requiere un análisis matemático muy complejo, que no se encuadra en el estudio de esta tesis. A continuación se proporciona las expresiones más usuales para estimar su resistencia. Para determinar la resistencia de este tipo de electrodos de tierra se puede determinar con la siguiente ecuación.

$$R_{vq} = C \times R_v \quad (4.7)$$

Donde $C = 0.2$ valor típico.

R_{vq} resistencia de la varilla química

Cuando se tiene n varilla químicas.

$$R_{nvq} = (R_{vq} \times K) / n \quad (4.8)$$

Para calcular la resistencia de una varilla química acondicionada con Gaf (chocoto)

$$R_{vqa} = \left| C \cdot E \cdot \rho_{gaf} + (1 - E) \rho \right| / (2 \cdot \ln(h^2 / d^2)) \quad (4.9)$$

Donde: E constante del efecto de la interacción con la tierra dentro del HI que tiene un valor constante de 0.68

ρ_{gaf} es la resistividad del elemento químico Gaf que es de 0.8 $\Omega\text{-m}$

4.5. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA CON MALLA.

Es un sistema formado por el cruce de varios conductores de cobre desnudos enterrados horizontalmente a una profundidad de 0.4 a 1 m, para prever varios caminos de paso de la corriente, evitando caídas de potencial elevadas.

Cuando el área asignada para la malla de tierra es pequeña y no se consigue los valores adecuados de resistencia tenemos la posibilidad de agregar varillas verticales a lo largo del perímetro de la malla, formando cuadros de 2 a 5 veces la longitud de los electrodos. El resultado será una resistencia muy baja. La ventaja que brinda el diseño de una malla es: bajos gradientes de potencial de tierra, puesto que la corriente de falla se distribuye en toda la malla de tierra y los potenciales de igual manera. Ver figura.4.6

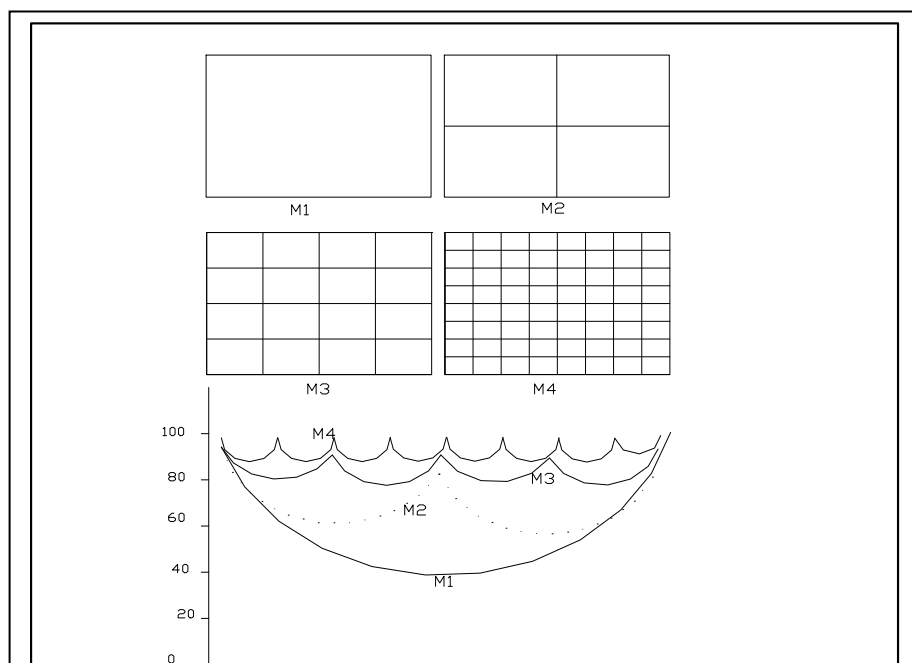


Fig. 4.6 distribución de incrementos de potencial con diferentes mallas

Para el diseño de una malla de tierra se debe seguir los siguientes pasos.

1. Estudio del sistema.

Debemos obtener todos los datos de campo donde se va instalarse la malla como el ancho el largo de la estación, es decir su área, Determinamos la disposición de la malla es decir la profundidad a la que queremos enterrar la malla, el numero de divisiones que va a tener la malla (N).

$$N = \sqrt{Na \times Nb} \quad (4.10)$$

Donde: N_a número de conductores en una dirección que se desee instalarse en la parte ancha. De la malla

N_b número de conductores en una dirección que se desee instalarse en la parte larga de la malla. Los valores típicos de número de divisiones (N) y la separación entre conductores enterrados (D) se dan en la tabla 4.1.

| N | D (Metros) | N | D (Metros) |
|---|------------|----|------------|
| 2 | 120 | 17 | 7.5 |
| 3 | 60 | 18 | 7.06 |
| 4 | 40 | 19 | 6.67 |
| 5 | 30 | 20 | 6.32 |
| 6 | 24 | 21 | 6 |
| 7 | 20 | 22 | 5.71 |

| | | | |
|----|-------|----|------|
| 8 | 17 | 23 | 5.45 |
| 9 | 15 | 24 | 5.22 |
| 10 | 13.23 | 25 | 5 |
| 11 | 12 | 26 | 4.8 |
| 12 | 10.91 | 27 | 4.62 |
| 13 | 10 | 28 | 4.45 |
| 14 | 9.23 | 29 | 4.29 |
| 15 | 8.57 | 30 | 4.14 |

TABLA 4.1

Luego determinamos L longitud total del conductor enterrado que es necesario para este diseño, con la ayuda del área y del número de divisiones de la malla.

2. Selección de conductores.

La selección del material del conductor, y del tamaño del conductor es decir su sección del conductor depende de algunos factores como son:

- Tener suficiente conductividad de manera que de manera que no contribuya sustancialmente a la diferencia de potencial de la malla.
- Resistente a las altas temperaturas y deterioros mecánicos bajo los mas adversos magnitudes de corriente de falla.
- Alta resistencia a la corrosión.

El cobre es un material más común y más usado para el diseño de malla de tierra.

En la tabla 4.2 muestra algunos tipos de materiales utilizados para los sistemas de puesta a tierra.

Para calcular la sección del conductor podemos determinar con la siguiente ecuación.

$$A = (I) / \sqrt{\{ \text{Ln} [(T_m - T_a) / (234 + T_a)] + 1 \} / 33.t} \quad (4.11)$$

Donde:

A = sección del conductor en circular mil.

I = Es la corriente en amperios.

T_m = máxima temperatura permisible en grados centígrados

T_a = es la temperatura ambiental en grados centígrados.

t = Tiempo de duración de la falla en segundos por lo general (3 segundos).

El punto de fusión del cobre es de 1083 grados centígrados

| Descripción | conductividad del material (%) | temperatura de fusión (°c) |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Conductor Estándar de cobre suave | 100 | 1083 |
| Conductor de cobre estirado en frío | 97 | 1084 |
| Conductor de acero revestido con cobre | 40 | 1084/1300 |
| Conductor de aluminio | 61 | 657 |
| Conductor de aleación de aluminio 5005 | 53.5 | 660 |
| Conductor de aleación de aluminio 6201 | 52.5 | 660 |
| Conductor de acero revestido con Zinc | 8.5 | 419/1300 |
| Conductor de acero inoxidable 304 | 749 | 1400 |

Tabla 4.2

3. Cálculo de la resistencia de Puesta a tierra.

Para calcular la resistencia de puesta a tierra de una malla podemos calcular de dos formas.

Por Laurent.

$$R_m = \rho \left[\frac{1}{L} + \sqrt{\frac{20}{A}} \right] \times \left[1 + \frac{1}{1 + h_1 \sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \quad (4.12).$$

Donde: A es el área ocupada por la malla m^2 .

L longitud total de conductor enterrado.(m)

ρ resistividad de la tierra (ohmios-m)

h_1 profundidad de los conductores enterrados horizontalmente (m)

Por Schwarz.

$$R_c = \frac{(R_1 \times R_2) - (R_{12})^2}{R_1 + R_2 - 2.R_{12}} \quad (4.13)$$

R_1 es la resistencia de los conductores de la malla.

R_2 es la resistencia de todas las varillas de puesta a tierra.

R_{12} es la resistencia mutua entre los conductores de la malla y las varillas de puesta a tierra.

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi.L} \left[\ln\left(\frac{2L}{h_2}\right) + K_1 \cdot \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (4.14)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot h_2} \left[\ln\left(\frac{8h_2}{d_2}\right) - 1 + h_2 \left(\frac{2 \cdot K_1 \cdot h_2}{\sqrt{a}} \right) \right] \times \left[\sqrt{(n-1)^2} \right] \quad (4.15)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi.L} \left[\ln\left(\frac{2L}{h_2}\right) + K_1 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{A}} \right) - K_2 \right] \quad (4.16)$$

Donde: A es el área ocupada por la malla m^2 .

L longitud total de conductor enterrado.(m)

ρ resistividad de la tierra (ohmios-m)

h_1 profundidad de los conductores enterrados horizontalmente (m)

h_2 longitud de la varilla enterrada.(m)

K_1 y K_2 dados por la figura 4.2.

d_2 diámetro de la varilla (m)

d_1 diámetro del conductor de la malla (m)

n número de varillas localizadas en el área.

4. Determinación de los gradientes de potencial.

- Cálculo del máximo aumento del potencial de la red.

El aumento máximo de potencial de la red que tomamos como ejemplo respecto a tierra absoluta se calcula mediante la ecuación (4.17), este potencial genera un gradiente que tiene una distribución por toda la instalación siendo susceptible de ser contactado por una persona que se encuentre en el campo electrostático creado, en su totalidad o en parte. A la diferencia total de potencial concatenada se la conoce como potencial de toque.

$$U = (K_m \times K_i \times \rho \times I) / (L + 1.2 \times L_r). \quad (4.17)$$

Donde:

L_c = Longitud total del conductor enterrado.

L_r = Longitud total de varilla enterrada.

$K_m K_i$ = factores que dependientes de varios factores que veremos a continuación.

Si el potencial de la malla no excede de la diferencia de potencial o tensión de toque (ED) determinado anteriormente sec 3.5, entonces el diseño de la red está correcto y no se necesitara hacer un rediseño.

$$K_m = (1/2 \pi) \ln(D^2 / 16xhxd) + 1/\pi \times \ln((3/4)(5/6)(7/8)). \quad (4.18)$$

$$K_i = 0.565 + 0.12N. \quad (4.19)$$

Donde:

I = Corriente de falla que debe disipar el conductor.

t = tiempo en el cual dura la falla.

K_i, K_m = constantes que dependen de

D = separación de los conductores enterrados de la malla en metros.

d = Diámetro de los conductores que forman la malla en metros.

h_1 = profundidad a que está enterrada la malla en metros.

N = número de divisiones de la malla.

En la figura 4.7 se puede apreciar algunos de estos parámetros.

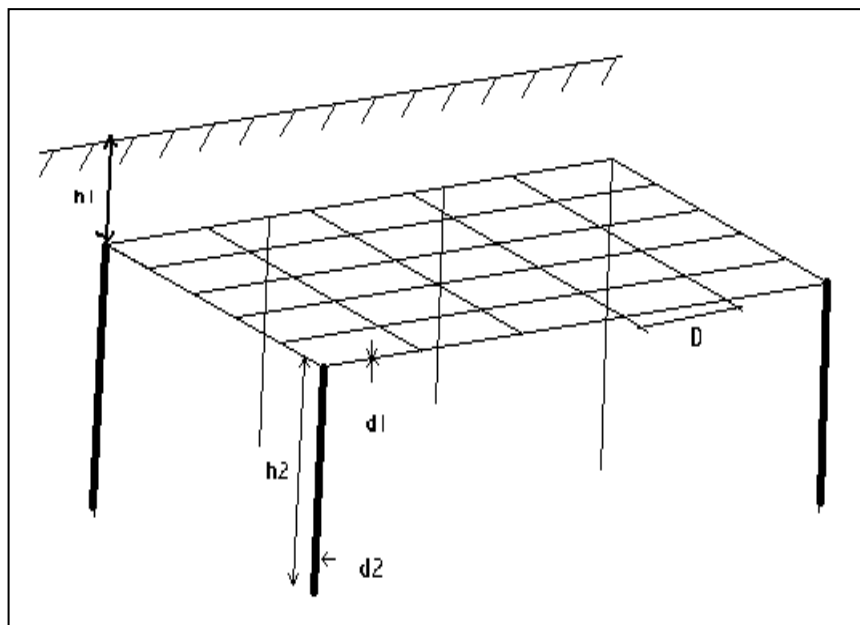


Fig 4.7 diseño de una malla de tierra.

Para determinar los valores de t tiempo de en el cual dura la falla podemos determinar basándose en la tabla 4.3 en el cual muestra los valores típicos de duración de la falla

| Duración de la falla en segundos | Circular Mils / AMP. | | |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| | Cable desnudo Solamente | Cable desnudo uniones soldadas | Cable desnudo juntas atornilladas |
| 30 | 40 | 50 | 65 |
| 4 | 14 | 20 | 24 |
| 1 | 7 | 10 | 12 |
| 0.5 | 5 | 6.5 | 8.5 |

Tabla (4.3) calibre mínimos de conductores de cobre para evitar fusión por sobre calentamiento.

Calculo de la diferencia de potencial en el piso en el exterior inmediato a la red.

Al dar el paso largo sobre el piso, mientras esta circulando la corriente de falla los pies concatenan una tensión que se las conoce como "voltaje de paso". El valor de esta diferencia de potencial, cuando esta circulando la corriente máxima de la falla por la red hacia la tierra, se calcula aplicando la ecuación (4.20).

$$U_s = (K_s \times K_i \times \rho \times I) / L \quad (4.20)$$

$$L = (L_c + 1.5 L_r). \quad (4.21)$$

Donde:

$$K_s = (1 / \pi) [\frac{1}{2}(h) + 1/(D + h) + 1/D (1 - 0.5^{n-2})] \quad (4.22)$$

K_s = Coeficiente que toma en cuenta n , D y h . que ya se definieron previamente.

El valor encontrado no debe superar el valor del potencial de toque (E_s) encontrado con la ecuación del potencial de paso definido en la sec (5.3).

V. METODOLOGÍA DEL APANTALLAMIENTO.

Todo sistema contempla un plan para el diseño del apantallamiento.

- 1. Levantamiento del plano físico de toda la instalación con todos los elementos a protegerse.**

En el plano físico se debe hacer contar todos los elementos, mecánicos como tanques de combustible, estructuras metálicas, generadores etc. Eléctricos como transformadores, motores, generadores, paneles de control etc. Construcciones civiles con todas sus respectivas medidas.

2. Determinación de la densidad de Rayos a tierra.

Para determinar la densidad de rayos a tierra en la zona podemos determinar por medio de dos métodos:

a. Nivel Isoceráunico que nos indica los días de tormentas por año registradas en una determinada zona, los mapas isoceráunicos del mundo y del Ecuador específicamente se encuentran en el apéndice B, son datos que se registraron durante los años 2000 al 2001 los mismos que fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología, Hidrología (INAMHI).

De acuerdo al mapa Isoceráunico del Ecuador que se encuentra en el apéndice B, el nivel que corresponde a la zona tropical es de 100.

b. Densidad de descargas a tierra por año por Km^2 (D_{GFD}) que es número de descargas a tierra que se espera por Km^2 , este método es el más confiable, para determinar D_{GFD} densidad de descargas eléctricas en la zona por este método primero debemos determinar la cantidad de precipitaciones T_d que a existido en una determinada zona durante un año estos datos generalmente son proporcionados por los departamentos de meteorología.

Luego determinamos el valor D_{GFD} con la ecuación siguiente.

$$D_{\text{GFD}} = 0.04 \times T_d^{1.25}. \quad \text{descargas por año por } \text{Km}^2. \quad \text{Ec. 2.7 Pg 34.}$$

Luego calculamos la probabilidad de descargas atmosféricas en el área de la estación, para lo cual calculamos CA el área de toda la estación.

$$CA = (L + 2.Rn) \cdot (A + 2.Rn) \quad \text{Ec 2.12 Pg 41}$$

Para determinar R que es el radio de atracción, el mismo que está tabulado en base a la altura a la cual se va a instalar el elemento de protección contra descargas atmosféricas (varilla Franklin) ver tabla (2.4 Pg 42).

Entonces la probabilidad de descargas en el área determinada será:

$$P = CA \times 10^{-6} \times \text{GFD. descarga por año en el área determinada.} \quad \text{Ec 2.8 Pg 35}$$

Con este valor ya podemos darnos cuenta de que si se justifica la instalación de la protección contra descargas atmosféricas directas.

Usando la expresión 2.9 pagina 35 se determina el periodo de regreso (Re) de la descarga este valor viene en años.

$$Re = 1 / P \text{ años}$$

Este periodo de retorno moderado, que significa en este tiempo de (Re) la instalación a de ser impactada. A demás este dato debe interpretarse como un valor probabilística, pues no significa que la instalación necesariamente a de ser impactada en este lapso, es posible que no se produzca ninguna descarga directa durante este periodo o puede suceder que se produzca mas de una descarga en el días consecutivos durante una tormenta. Solo es una estimación probable del periodo de repetición de la caída del rayo en la estación.

Por otra parte, la probabilidad de un día de tormenta en la región del oriente es aproximadamente de $114.6 / 365 = 0.308$, la inversa de 0.308 es de 3.2 aproximadamente 3 días, esto quiere decir que de cada 3 días 1 día de tormenta, situación que con mayor razón obliga a que se disponga de un sistema de protección contra descargas atmosféricas.

Durante décadas y en diferentes lugares del mundo se han realizado investigaciones sobre densidad de rayos a tierra. Por muchas décadas, el parámetro universalmente aceptado para caracterizar la actividad eléctrica atmosférica de una región ha sido el Nivel Cerámico, definido como el número de días del año en que por lo menos es oído un trueno.

En la práctica, el índice de incidencia de caída de un rayo, para los propósitos de protección, es solo un valor referencial basado en probabilidades, ya que las descargas atmosféricas son fenómenos naturales a lo que todavía hay que estudiar.

Por otra parte para determinar la probabilidad de los días de tormenta en la región determinamos con la ecuación 2.4

Probabilidad de los días de tormenta es $365 / N_{ISO}$ días.

Esto quiere decir que del valor que se obtenga aquí 1 día de tormenta es posible.

Durante décadas y en diferentes lugares del mundo se han realizado investigaciones sobre densidad de rayos a tierra. Por muchas décadas, el parámetro universalmente aceptado para caracterizar la actividad eléctrica atmosférica de una región ha sido el Nivel Cerámico, definido como el número de días del año en que por lo menos es oído un trueno.

En la práctica, el índice de incidencia de caída de un rayo, para los propósitos de protección, es solo un valor referencial basado en probabilidades, ya que las

descargas atmosféricas son fenómenos naturales a lo que todavía hay que estudiar.

3. Cálculo del período de protección de la estación.

Para el cálculo de del periodo de protección utilizando la ecuación 2.10 pagina 39.

$$Y'' = Y \cdot (40 / N_{ISO}).$$

4. Elegimos el punto o puntos de mayor probabilidad de captura del rayo. Esto incluye la instalación de uno o más terminales de aire en los puntos más altos de la instalación. Para transportar las descargas eléctricas a tierra por caminos de baja resistencia. Para lo cual los terminales de aire se conectan a uno o varios cables descendentes, esto permite distribuir la corriente de descarga en uno o más caminos y, de ese modo, reducir el peligro de una descarga lateral.

Como se conoce los sistemas de pararrayos tienen por finalidad interceptar las descargas de los rayos y conducirlos a tierra. Naturalmente, subsiste la posibilidad de que el rayo no sea interceptado, por lo que se tiene un valor de riesgo de falla de apantallamiento como se vio anteriormente.

Puesto que la probabilidad de que un rayo se descargue en la parte más alta, es necesario que el elemento a proteger contra descargas atmosféricas este situado en una parte más alta de todos los elementos en la estación para poder cubrir todos los elementos y protegerlos.

5. cálculo y determinación de los radios de protección

Para determinar los radios de protección se debe utilizar los modelos electro geométrico de cada uno de los métodos de las zonas de protección, para proteger todas las líneas de energía que ingresan a las instalaciones de los sobrevoltaje y sobre corriente de todos los equipos en general de la locación y determinar que método es el más adecuado para el apantallamiento.

Además se debe proteger todas las líneas de entrada de datos (señales) de telecomunicaciones de los sobrevoltaje y sobre corrientes, eliminación de los lazos de tierra (ingreso de ruido eléctrico en modo normal o común).

Alternativa. 1

Como primer paso, vamos a evaluar la zona de protección basándose en modelo electro geométrico desarrollado por Linck.

Conocido los valores de D_{GFD} densidad de descargas al año en un Km^2 además el periodo de protección y la altura del elemento podemos calcular el radio de protección (r_p) del área protegida, mediante el gráfico 2.13.

Si el radio de protección determinado en este paso no cubre toda el área de la estación se puede aumentar otro elemento de protección contra descargas atmosféricas y luego calcular los dos radios de protección, a fin de generar traslapes en sus volúmenes de protección. Por lo tanto tener una mayor capacidad de intercepción de los canales de rayos.

A continuación empleando los métodos del cono de protección, radios de aproximación, Golde y Linck, se procede a realizar los cálculos de las formas

geométricas de las zonas de protección, para saber si es conveniente el sistema propuesto.

Cabe señalar que para la determinación de la zona de protección por los tres primeros métodos, se ha tomado en cuenta un rango de magnitudes de corriente de descarga esperadas superiores a los 10 KA, los cuales tienen un 93% de probabilidad de ocurrencia.

Es evidente que una protección 100% efectiva es virtualmente imposible y ciertamente no es económicamente práctico, un valor del 93% es aceptable. Ver tabla (2.3)

Cálculo de la zona de protección por el método del cono de protección.

Parámetros de diseño:

Altura del pararrayos P1:

Altura del pararrayos P2

Para el pararrayo P1.

$$r = h_1; \quad r = h_1 \times \tan 45^\circ \quad \text{Ec 2.14 Pg 44}$$

$$r = 50.8 \times h^{0.293} \quad \text{Ec 2.15 Pg 44}$$

Para el pararrayo P2.

$$r = h_1; \quad r = h_1 \times \tan 45^\circ$$

$$r = 50.8 \times h^{0.293} = 50.8 \times (54.13)^{0.293}$$

Cálculo de la zona de protección por el método de Golde.

Parámetros de diseño:

Nivel de protección estándar del 93 %, según la recomendación de la tabla 2.3

Nivel de bloqueo inferior recomendado 10 KA. Tabla 2.3

Carga del canal de conducción de 1 Culomb, valor obtenido de la tabla 2.5.

Radios de atracción D_i 40 m aproximadamente, obtenido a partir de la curva de la figura 2.9.

Para el pararrayo P1.

Si cumple con la condición $D_i < h$

Entonces: $r = D_i$

Para el pararrayo P2.

Si cumple con la condición $D_i > h$.

$$r = (2.D_i.h - h^2)^{1/2}$$

Nótese que los radios de la base del cilindro de protección no proporcionan suficiente protección contra descargas directas, pero debe tenerse en presente que cada elemento captor atrae rayos y al hacerlo en mayor número, mayor será la probabilidad de caída del rayo sobre el área protegida.

Si aumentando los elementos de protección contra descargas atmosféricas (varillas franklin) no cubren toda el área protegida y se requiere una mayor confiabilidad en el apantallamiento se puede optar por los elementos de nueva tecnología que son los elementos de ionización como una nueva alternativa.

Alternativa 2.

La instalación del sistema PREVETRON El cual crea una zona ionizada más amplia y dinámica, lo que elimina la ineficiencia del flujo ascendente de conexión con el canal descendente que presenta el tipo de pararrayos convencionales, ya que al disponer fuentes radioactivas que emiten continuamente partículas radioactivas, provocando una región ionizada del aire más amplia, liberando electrones, que proporcionan caminos fáciles para las descargas del rayo en dirección al terminal captor, este es un sistema de pararrayos más seguro y confiable, la cobertura del pararrayos alcanzan un mayor radio con diferentes modelos y versiones. Ver tablas (2.6 2.7 2.8)

La instalación de estos tipos de elementos de nueva tecnología están sujetas a las normas francesas NF C 17 102, mismos que para su instalación se debe determinar los siguientes factores.

a. Determinación el nivel de protección

Para determinar los niveles de protección primeramente calculamos (**Nd**)

Nd es la frecuencia de descargas atmosféricas directas esperados a caer en la estructura o zona. La frecuencia promedio anualmente Nd de descargas directas sobre una estructura es determinada usando la siguiente ecuación.

$$\mathbf{Nd = Ng\ max. \times Ae \times 10^{-6}/año. \quad (5.1)}$$

Donde:

Ng max = es la densidad promedio de descargas anualmente en la región donde la estructura esta localizado (numero de descargas de rayos /año / Km²).

Ae = Es el área equivalente de la estructura aislada en (m²).

Para determinar el Área de toda la estructura la cual esta definida como el área sobre la superficie de la tierra. Por ejemplo para el área de una estructura rectangular, el grafico del área a ser protegida en la superficie será.

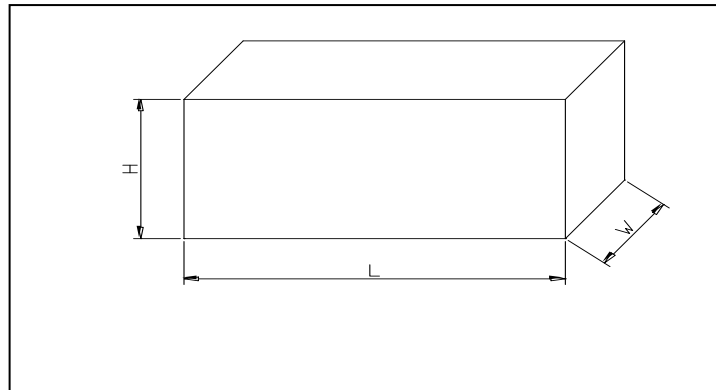


FIG. 5.1. Elemento a ser protegida contra las descargas atmosféricas

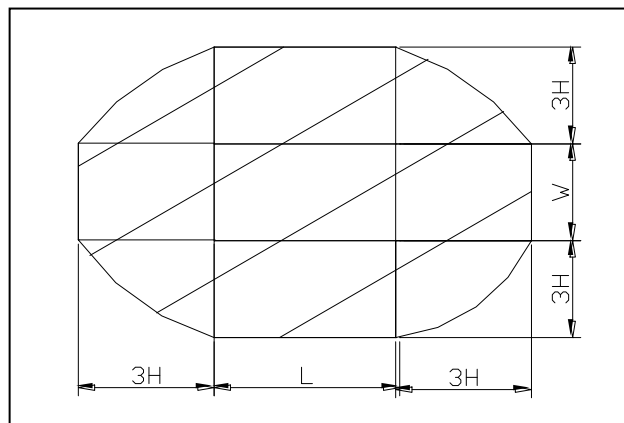


FIG. 5.2. Área de la superficie apantallada con el dispositivo de cebado

Para la estructura rectangular, el área será:

$$A_e = L \times W + 6H(L + W) + 9\pi \times H^2 \quad (5.2)$$

Para estructura altas como torres, edificios, estaciones de telecomunicación el área apantallada (A_e) solamente será una circunferencia con un radio de $3H$, entonces:

$$A_e = (3H)^2 \times \pi = 9 \times \pi \times H^2 \quad (5.3)$$

Donde H es la altura a la cual se instala el elemento de ionización.

Luego determinamos las causas de un rayo sobre la estructura. (**Nc**)

Los valores de Nc están determinados por medio del análisis de los daños y riesgos, tomando en cuenta de factores adecuados tales como:

- ▶ Tipo de construcción.
- ▶ Contenido de la estructura.
- ▶ Ocupación en la estructura.
- ▶ Consecuencias de las descargas de los rayos.

$$N_c = 5.5 \times 10^{-3} / C \quad (5.4)$$

$$C = C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \quad (5.5)$$

Para determinar los valores de Nc primero se determinaran los coeficientes C2, C3, C4, C5, los cuales se encuentran en las siguientes tablas.

| C2 Coeficiente estructural | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| Estructura | Techo | Metal | Común | Inflamable |
| Metal | | 0.5 | 1 | 2 |
| Común | | 1 | 1 | 2.5 |
| Inflamable | | 2 | 2.5 | → 3 |

Tabla 5.1 Valores de C2

| C3, Contenido en la estructura | |
|---------------------------------------|-----|
| No existe elementos inflamables | 0.5 |

| | | |
|--|---|---|
| Valor estándar de elementos inflamables | → | 1 |
| Elementos de inflamación alta. | | 2 |
| Elementos de inflamación alta y explosivos | | 3 |

Tabla 5.2 Valores de C3

| C4, Ocupación de la estructura. | |
|---|-----|
| Desocupada | 0.5 |
| Normalmente ocupada | → 1 |
| Dificultad de evacuación o riesgo de pánico | 3 |

Tabla 5.3 Valores de C4

| C5, Consecuencias de rayo. | |
|---|-----|
| no requiere de servicio continuo y no existe consecuencias en el medio ambiente | 1 |
| Requiere de servicio continuo y no existe consecuencias en el medio ambiente | → 5 |
| Consecuencias en el medio ambiente | 10 |

Tabla 5.4 Valores de C5

Luego determinamos el nivel de protección.

Los valores de N_d y N_c son comparados, los resultados de esta comparación es usado para decidir el sistema de protección contra el rayo y por lo tanto el nivel de protección a ser usado.

Si $N_d \leq N_c$, no requiere un sistema de protección contra descargas atmosféricas
 Si $N_d > N_c$, si es necesario un sistema de protección contra descargas atmosféricas, entonces $E \geq 1 - N_c / N_d$. Aquí se selecciona el nivel de protección a ser instalado. Ver Tabla (5.5).

El sistema de protección diseñado debe reunir todas las especificaciones dadas en la norma para el nivel de protección.

En la tabla (5.5) da los valores efectivos E correspondientes a los límites entre el nivel de protección y el nivel de protección correspondiente a los calculados.

| E calculado | asociado al nivel de protección | corriente pico I (KA) | Distancia de inicio D (m) |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| $E > 0.98$ | Nivel I + medida adicional | - | - |
| $0.95 < E \leq 0.98$ | Nivel III | 14.5 | 60 |
| $0.80 < E \leq 0.95$ | Nivel II | 9.5 | 45 |
| $0 < E \leq 0.80$ | Nivel I | 2.8 | 20 |

Tabla 5.5 Método para seleccionar el nivel de Protección

Luego determinamos el nivel de protección

$$E \geq 1 - N_c / N_d \geq 1 - 0.001 / 1.49 \geq 0.989$$

b. Determinación de los radios de protección

Para conocer el radio de protección Rp de este tipo de pararrayos referirse a las tablas 2.6 2.7 2.8 para $h < 5m$. Para conocer el radio de protección Rp del pararrayo PREVETRON con $h > 5$ se calcula con la formula siguiente:

$$R_p = \sqrt{[h(2.D - h) + \Delta L(2.D + \Delta L)]} \quad (5.6)$$

Donde:

D = Nivel de protección Para este caso: 60.

ΔL = Distancia de impacto.

h = altura a la cual se calcula el radio de protección ver figura (4.1)

Para determinar la longitud de impacto (ΔL) utilizaremos la velocidad del rayo que es aproximadamente de 1 m / μs y el tiempo de respuesta del elemento (tiempo de cebado Δt). Que podremos determinar sobre la base de la tabla (2.9).

$$\Delta L = V \times \Delta t \quad (5.7)$$

Donde :
V = velocidad de la descarga
 Δt = tiempo de cebado del elemento

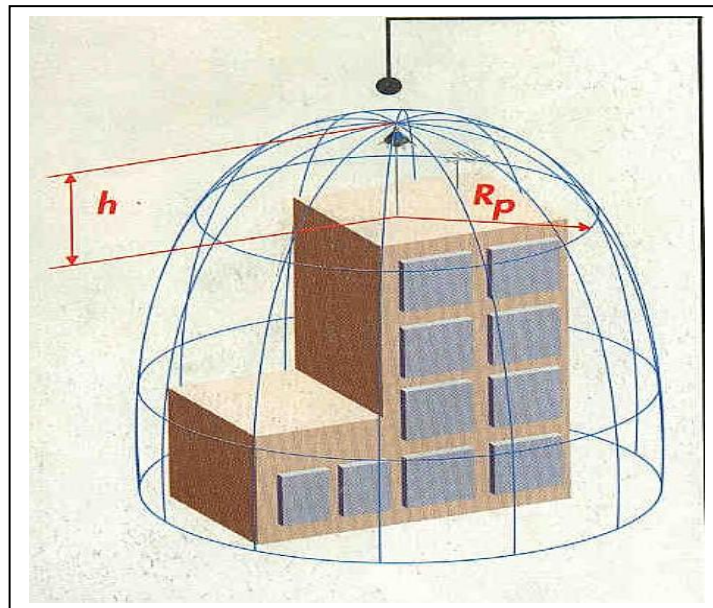


Fig 5.3 altura a la cual se calcula el radio de protección

CAPITULO VI

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE PUESTA A TIERRA.

1. Levantamiento del Plano de la planta del sistema eléctrico.

En el diagrama unifilar del sistema eléctrico debe constar todos los equipos como motores, generadores, transformadores con su respectiva potencia y nivel de voltaje nominal, corriente nominal y su impedancia en por unidad.

2. Investigación de las características del suelo a través de las mediciones para poder determinar la resistividad (ρ). Y estudio de los lugares disponibles y las facilidades que presentan los mismos para la instalación de la puesta a tierra.

Los materiales que se necesitan para esta medición son:

Un Meger de cuatro bornes para medir la resistividad de tierra.

4 electrodos de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19mm), por 0.4m. de longitud que cumple con la recomendación $H = 1/20$ de L . donde $L = 8$ m y $H = 0.4$ m.

4 cables flexibles #14 AWG de 10m. De longitud para conectar las piquetas a los bornes del instrumento. Se ha considerado una distancia L igual a 8m.

Para poder realizar la medición de la resistividad del terreno debemos seguir los siguientes pasos.

- Seleccionar el sitio adecuado para realizar estas mediciones, es decir donde exista tierra firme o sea donde no exista material como grava en la superficie para que no perjudique de esta manera la medición.
- Realizar el hincado de los 4 electrodos a una profundidad de 0.4 m, separados entre un electrodo y otro una longitud de 8 metros.
- Realizar las conexiones entre los bornes del megger y los electrodos, los dos electrodos del extremo van conectado a los bornes de corriente del megger y los electrodo del medio irán conectado a los bornes de voltaje.

- Las medidas tomadas se registran en una tabla similar a la ilustrada en la tabla 5.1, esta facilita visualizar los valores R, y estos deben multiplicarse por el factor $K = 2 \cdot \pi \cdot L$, que permite obtener la resistividad del suelo en la franja comprendida entre la superficie y profundidad $h = (3/4) \cdot L$, que se registra en la tercera columna.

| Registro de medición de la Resistividad | |
|---|---|
| Número de medición | Lectura del aparato |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| N | |
| Factor $K =$ Distancia $L =$ | \sum de las $\rho =$ ρ promedio = |

Tabla 3.2. Registro de la resistividad.

Luego sacaremos la resistividad promedio aparente y esta resistividad utilizaremos para el diseño.

3. Calcular la máxima corriente de falla fase tierra.

Para el cálculo de la corriente de falla fase tierra, trifásica, se puede calcular de varias maneras como por ejemplo con la ayuda de un computador y un software para el cálculo de las corrientes de corto circuito, cuando el sistema es demasiado grande, por ejemplo para sistemas de distribución de gran magnitud.

También se puede calcular por medio del método del MVA.

Para evaluar la intensidad de la corriente máxima debido a cortocircuito simple (línea-tierra), utilizando el método del MVA necesitamos principalmente el diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia con todos los equipos eléctricos con sus respectivas potencias, voltajes y sobre todo la reactancia subtransitoria positiva, negativa y secuencia cero en por unidad.

Se debe tener en cuenta que la reactancia de secuencia positiva es igual a la reactancia de secuencia negativa, si no contamos con el valor de la reactancia cero se asume la mitad de la reactancia positiva.

Prácticamente el método del MVA se usa separando el circuito en sus componentes y colocando cada componente con su propio bus infinito, para lo cual se pasa del diagrama unifilar Ver apéndice A del sistema en estudio a un diagrama de impedancias y al diagrama de MVA, dividiendo su potencia en MVA para la impedancia en por unidad. Para el cálculo de las corrientes de falla fase tierra por el método del MVA, se deben colocar en el circuito unifilar todos los valores respectivos del valor de MVA como muestra la expresión (6.1).

$$\mathbf{MVAcc = MVA / X (p.u). \quad (6.1)}$$

Luego para resolver el circuito se procede de la siguiente forma: los valores de MVA que están en el circuito en paralelo se resuelve como si estuviesen en serie, y los valores de MVA que estén en serie se resuelve como si estuviesen en paralelo.

Si en algún caso no se cuenta con la reactancia subtransitoria se puede sacar dividiendo los valores de corriente nominal para la corriente de arranque que es igual a 5 veces la corriente nominal.

4 Calculada ya la corriente de corto circuito falla fase tierra se procede a seleccionar el tipo de electrodo de tierra más apropiado para disipar toda la corriente de falla, sin poner en peligro al personal ni a los equipos, con los potenciales peligrosos de tierra.

El diseño preliminar del tipo de electrodo, dimensiones, geometría del arreglo a emplearse para soportar y conducir la corriente de falla, y determinación de la profundidad conveniente para la ubicación de la puesta a tierra tratando de aprovechar las capas de menor resistividad. En definitiva cuando los estratos superficiales son más conductivos que los inferiores, una toma tipo horizontal es la más aconsejable. En tanto que las tomas tipo vertical se efectúan en los lugares donde los estratos más profundos son de menor resistividad que los superficiales, la longitud de los electrodos debe ser la suficiente para alcanzar la capa con mejores características conductivas.

En sistemas eléctricos de potencia las tomas de tierra más usuales pueden ser: varilla simple, Grupos de varillas, malla, combinación malla varilla y varillas Químicas. La elección y diseño de las mismas esta en función de la resistividad y de la resistencia de aterrizaje que se desea obtener a fin de asegurar la disipación de la corriente.

Para el diseño preliminar del electrodo de puesta a tierra se debe considerar lo siguiente:

Para estaciones de generación eléctrica, subestaciones eléctricas y industrias que manejen altos voltajes, corrientes de falla elevados y potencias considerables es necesario el diseño de una malla de tierra, pero para industrias de menor magnitud tan solo con varillas conectados en paralelo o varillas químicas podría

ser una solución adecuada. Las carcasas de todos los dispositivos eléctricos, electrónicos tanto de corriente alterna como de corriente continua del equipo debe contar con una apropiada conexión a tierra de baja resistencia, para una operación eficiente de cada uno de los elementos y a su vez servir de protección tanto para los equipos como para el personal en el momento que se presenta una falla, cortocircuito o descarga atmosférica.

5 Cálculo del valor teórico de la resistencia de aterrizaje, según la configuración elegida, mediante el uso de expresiones matemáticas.

a) **Con varillas Sencillas**

Parámetros de diseño y cálculos:

$\rho = 9.68 \Omega\text{-m}$ ver sec.(3.2.1) Proceso de medición de la resistividad

Longitud del electrodo $h_2 = 1.8 \text{ m}$

Diámetro del electrodo $d_2 = 5/8" = 0.0158 \text{ m}$.

Para determinar la resistencia con una sola varilla aplicamos la ecuación (4.1) pg 108

$$R_v = [\rho/2.\pi.h_2] \times \ln [(4.h_2/d_2)-1] \quad \text{Ec (4.1) pg 108}$$

Si la resistencia con una sola varilla es alto podemos conectar en paralelo varias varillas.

Número de varillas $n = 2$ varillas.

Luego calculamos el hemisferio de interfase H_I .

$$H_I = n \times h_2 = 2 \times 1.8 = 3,6.$$

Con este valor determinamos el K_1 que se encuentra en al figura 4.2.

Con estos valores ya podemos determinar la resistencia del electrodo con dos varillas conectadas en paralelo.

$$R_{nv} = (R_v \cdot K_1) / 2 \quad E_c \text{ (4.4) Pg 109}$$

Si la resistencia aun con esta modificación es alta podemos continuar aumentando las varillas conectas en paralelo. Luego de haber realizado el estudio se puede determinar que con un arreglo a las varillas conectas en forma de triangulo.

b. Varillas conectadas en triangulo.

El diseño más adecuado para este tipo de equipos es el una pequeña malla en triangulo (ver figura 6.1), este diseño es favorable puesto que la resistividad de la tierra es bastante buena.

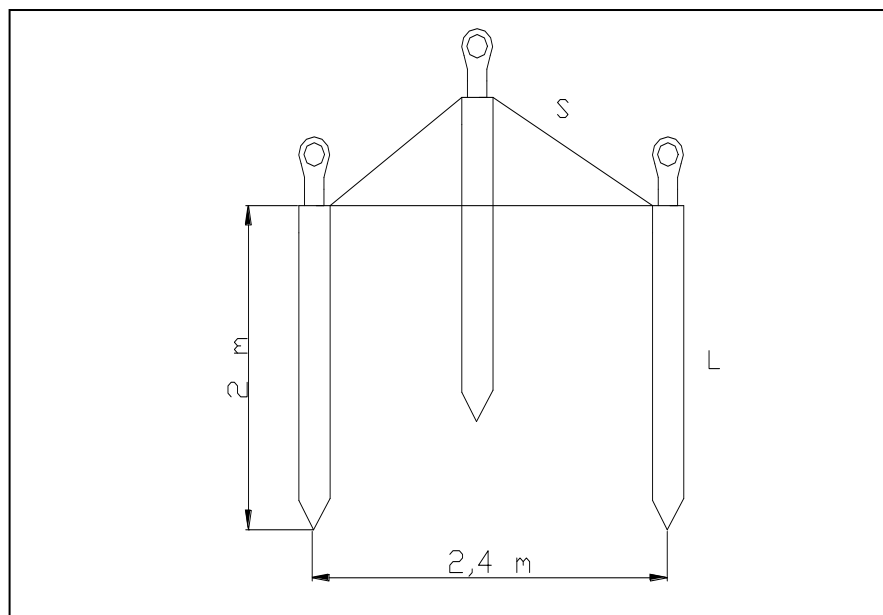


Fig. 6.1 Diseño de varillas conectadas en Triangulo

Este tipo de electrodos de tierra es una selección bastante buena puesto de la resistencia y los niveles de potencial con respecto a tierra es bastante bajos.

Para calcular la resistencia de este tipo de electrodo utilizamos la formula (4.5)

$$R = \left| \frac{\rho}{(2 \cdot \pi \cdot h^2)} \right| \times \left| \ln(2 \cdot h^2/A) \right| \quad \text{Ec (4.5). Pg 111}$$

$$A = 3 \sqrt{(d^2/2 \times S^2)} \quad \text{Ec (4.6) Pg 112}$$

C. Con Varillas Químicas (Chem-Rod):

En lugares donde la resistividad del suelo es elevada y el espacio disponible es limitado, hay un límite en el cual la resistividad no se puede reducirse utilizando tecnología convencional, por lo tanto, deben explorarse otras alternativas. La opción restante para el mejoramiento del suelo es el acondicionamiento automático mediante el denominado Chen- Rod (varilla química). Es el sistema de puesta a tierra más eficiente que existe actualmente, y una vez instalado proporciona una conexión de baja resistencia.

La razón para establecer una mayor eficiencia del electrodo activo es que proporciona una conexión perfecta a tierra, mediante el continuo acondicionamiento del terreno que lo rodea. A diferencia de otros sistemas de puesta a tierras tradicionales.

El valor estimado de resistencia para un electrodo activo R_{vq} , es:

$$R_{vq} = (0.2) \times R_v. \quad \text{Ec (4.7).}$$

De hecho, las varillas activas son tan eficientes que una sola de ellas pueden reemplazar hasta 10 electrodos convencionales. Este factor es muy importante en la estimación del número de electrodos y área de terreno que se necesita para obtener valores de baja resistencia. Aún es más importante cuando se tiene en cuenta que las normas vigentes de puesta a tierra han adquirido un nivel de exigencia muy considerable, llegando a valores absolutos mínimos, haciendo que el número de electrodos y terreno requerido aumenten exponencialmente.

Para calcular el valor de la resistencia de aterrizaje aplicamos la expresión siguiente.

$$R_{vqa} = \left[\frac{E \rho_{GAF} + (1-E) \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \right] \times \left[\ln\left(\frac{4 \cdot h^2}{d^2}\right) - 1 \right]$$

$E = 0.68$ constante del efecto de la interacción con la tierra dentro del HI sec (4.4)
Pg 113.

$$\rho_{GAF} = 0.8. \Omega\text{-m}$$

d. Diseño de la malla de tierra.

A continuación, dentro de esta alternativa, se presenta los cálculos de la resistencia a tierra.

Para el diseño de una malla de tierra debemos seguir los pasos descritos en la sección (4.5).

1. Determinación de configuración inicial de la malla.

Luego calculamos N.

$$N = \sqrt{N_a \times N_b} \quad \text{Ec (4.10)}$$

Conociendo el valor del área de la locación podemos calcular el valor de la longitud total del conductor.

La profundidad recomendada por la norma IEEE 80 recomienda una profundidad desde 0.5 hasta 1 metro de profundidad, de acuerdo a la resistividad del terreno.

2. Selección de conductores

Para determinar la sección del conductor podemos calcular con la ecuación (4.11), pero por lo general una malla de tierra típica para una subestación puede comprender, cable de cobre desnudo calibre 4 / 0 AWG, tanto para no dar lugar a las fallas mecánicas de los conductores. Sin embargo el valor de la sección del conductor se puede determinar mediante la ecuación siguiente.

$$A = (I) / \sqrt{\{ \text{Ln} [(T_m - T_a) / (234 + T_a)] + 1 \} / 33.t} \quad E_c \quad (4.11)$$

3. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

Para calcular el valor de la resistencia de la malla de tierra se puede calcular por 2 métodos por Laurent y por Schwarz. Laurent utilizamos solamente para calcular cuando la malla es solamente conductores enterrados en forma de una malla, Schwarz utilizado para calcular cuando existe una combinación entre malla y varillas.

Método de Laurent.

$$R_m = \rho \left[\frac{1}{L} + \sqrt{(20.A)} \right] \times \left[1 + \frac{1}{(1 + h) \sqrt{(20 / A)}} \right] \quad E_c \quad (4.12).$$

Método de Schwarz

$$R_c = \frac{(R_1 \times R_2) - (R_{12})^2}{R_1 + R_2 - 2.R_{12}} \quad (4.13)$$

$$R_{12} = \frac{\rho / (\pi.L)}{x} \left[\text{Ln}(2L/h^2) + K_1.L / \sqrt{(A - K_2 + 1)} \right] \quad (4.14)$$

$$R_2 = \frac{\rho / (2.\pi.n.h^2)}{x} \left[\text{Ln}(8h^2/d^2) - 1 + h^2 \right] \frac{(2.K_1.h^2) / \sqrt{(a)}}{x} \sqrt{(n) - 1} \quad (4.15)$$

$$R_1 = \frac{\rho / (\pi.L)}{x} \left[\text{Ln}(2L/h^2) + K_1.(L / \sqrt{A}) - K_2 \right] \quad (4.16)$$

6. CÁLCULO DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL.

Primeramente calculamos El voltaje de paso (ED) y voltaje de paso (Es).

$$E_D = (116 + 0.174 \rho_s) / \sqrt{t}.$$

Luego calculamos el aumento del potencial de la red y la diferencia de potencial en el piso en el exterior inmediato a la red. Si los valores de U_m y U_s no sobrepasan de los valores de E_D y E_S . Entonces no abra la necesidad de realizar un rediseño.

Calculo del máximo aumento del potencial de la red.

$$U_m = (K_m \times K_i \times \rho \times I) / (L + 1.2 \times L_r). \quad E_c (4.17)$$

$$K_m = (1 / 2 \pi) [\text{Ln} (D^2 / 16xhxd) + 1 / \pi \text{Ln} (3 / 4) (5 / 6) (7 / 8)]. \quad E_c (4.18)$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n. \quad E_c (4.19)$$

Calculo de la diferencia de potencial en el piso en el exterior inmediato a la red

$$K_s = (1 / 2\pi) [\frac{1}{2}(h) + 1 / (D + h) + 1/D (1 - 0.5^{n-2})] \quad E_c (4.22)$$

$$K_s = 0.167.$$

$$U_s = (K_s \times K_i \times \rho \times I) / L \quad E_c (4.20)$$

Por lo tanto si la tensión de la red no excede del potencial de toque y paso entonces, la malla si esta diseñada bajo todos los parámetros mencionados anteriormente, y no hay que realizar ningún rediseño de la malla.

De los resultados obtenidos teóricamente se puede establecer que el uso de los electros activos remplaza con mucha ventaja a los sistemas tradicionales ya que garantizan que se tenga en forma permanente una resistencia de puesta a tierra baja, pero esta solución es apropiada en sitios donde la resistividad del terreno es demasiado alto, en lugares secos, rocosos, lo cual seria una muy buena alternativa.

También otra solución es el diseño la malla triangulada, solamente con tres varillas copperweld interconectadas con un conductor desnudo de cobre. Con este diseño si bajamos la resistencia a valores muy bajos y no utilizamos mayor espacio, es transportable en el momento cambio de sitio podemos desconectar, sacar las varillas y llevar a cualquier otro sitio.

VII APLICACIONES A LA COMPANIA HELMERICH AND PAYNE .

APANTALLAMIENTO.

1. Levantamiento del plano físico.

El plano físico con todos los elementos que tiene el equipos de perforación petrolera esta en el apéndice A, el mismo que esta con las medidas reales tomadas en la locación de Tiguino 10 incluido el campamento.

Los equipos que se tiene en el taladro de perforación son:

Top Driver. (motor de perforación de 400 KW DC)

Mud Pump. (Bombas de lodo 400 KW DC)

Draw Work (Malacates)

Mixer (mezcladoras de lodo)

Bombas de agua.

Compresores.

Transformadores.

Generadores Cat D398.

Casetas del SCR.

Torre de perforación

Choke Manifold (Elemento que sirve como válvula de cierre del pozo en caso que el pozo se reviente).

Tanques de almacenamiento de lodo.

Tanques de combustible.

Campamento.

Todos estos equipos se encuentran en el plano físico del anexo A.

2. Determinación de la densidad de rayos a tierra.

Para determinar D_{GFD} primeramente determinaremos el valor de T_d de igual manera contamos con datos del listado del numero de precipitaciones registradas en los años 2000 y 2001 en la ciudad del Coca (Aeropuerto del Coca), el mismo

que fue proporcionado por la Dirección General de Aviación Civil (DAC), estos datos se encuentran en el apéndice B y nos servirá para calcular la D_{GFD} .

Utilizando los datos del listado del número de tormentas (precipitaciones) registradas en un año en la zona del Oriente, en este caso tenemos los datos del número de precipitaciones de 119 para el año 2000 y 106 para el año 2001 (Ver apéndice B).

Luego sacamos el promedio de los dos años y tenemos que $Td = 112.5$

$$D_{GFD} = 0.04 \times Td^{1.25}. \quad \text{Ec. 2.7 Pg 34}$$

$$D_{GFD} = 0.04 \times 112.5^{1.25}.$$

$$D_{GFD} = 14.65 \text{ descargas al año en un Km}^2$$

Luego calculamos la probabilidad de descargas atmosféricas ya en el taladro de perforación, para lo cual calculamos CA el área de todo el equipo de perforación.

Con esta consideración, el riesgo de descarga en el equipo de perforación que esta ubicada en el oriente ecuatoriano, depende de una serie de factores, incluyendo su localización, puesto que se encuentra ubicado en el Oriente en una zona tropical de mayor número de tormentas al año. Tamaño, el área de la locación es aproximadamente de 463 pies de ancho x 287,6 pies de largo ver plano físico del apéndice A

Dimensión de la locación = 463 x 287,6 pies (141.12 x 87.47 m) ver plano físico Apéndice A.

La altura donde se piensa realizar la instalación del elemento de apantallamiento para este caso es en la parte superior de la torre de perforación.

Altura de la torre de perforación = 200 pies (60 m) Ver Apéndice A

Radio de atracción $R = 84$ m, dato obtenido a partir de la tabla 2.4, pagina 42 con una altura de 60 metros que es la altura de la torre de perforación. Utilizando la expresión 2.12 pagina 41, se procede a evaluar el área de captura de la instalación dando el siguiente resultado:

$$CA = (L + 2.Rn) . (A + 2.Rn)$$

$$CA = (141.2 + 2 \times 84) . (87.47 + 2 \times 84)$$

$$CA = 78991.32 \text{ m}^2.$$

Entonces la probabilidad de descargas en el equipo de perforación será:

$$P = CA \times 10^{-6} \times GFD. \quad \text{Ec 2.8 Pg 35}$$

$$P = 78991.2 \times 10^{-6} \times 14.65$$

$$P = 1.15 \text{ descarga por año en el equipo de perforación}$$

Usando la expresión 2.9 pagina 35 se determina el periodo de regreso de la descarga:

$$Re = 1 / P$$

$$Re = 1 / 1.15$$

$$Re = 0.86 \text{ años}$$

Esto significa que el lapso de unos 8 a 9 meses posiblemente exista una descarga en la locación de perforación. Por otra parte, la probabilidad de un día de tormenta en la región del oriente es aproximadamente de $112.5 / 365 = 0.308$, 112.5 es el valor promedio de la densidad de lluvias durante el año 2000 y 2001 ver pagina 146, la inversa de 0.308 es de 3.2 aproximadamente 3 días, esto quiere decir que de cada 3 días 1 día de tormenta, situación que con mayor razón obliga a que se disponga de un sistema de protección contra descargas atmosféricas.

3. Cálculo del periodo de Protección. Para el cálculo de del periodo de protección utilizando la ecuación 2.10 pagina 39.

$$Y'' = Y \cdot (40 / N_{ISO}).$$

$$Y'' = 100 \times (40 / 100)$$

$$Y'' = 40 \text{ años}$$

Esto quiere decir que tendremos una probabilidad de que en 40 años exista una falla del apantallamiento.

4.- Selección del punto de instalación del pararrayo

La necesidad de proveer un sistema de protección contra descargas atmosféricas deben asumirse en las primeras etapas de diseño, mediante la utilización de terminales de aire (protector), con ello se logra disminuir el riesgo de accidentes ocasionados por los rayos.

De acuerdo con la inspección realizada en el taladro de perforación del **RIG 132** de la compañía Helmerich and Payne se establece que no existe un elemento de protección contra descargas atmosféricas directas, que viendo desde el punto de vista costo beneficio que ofrecen estos elementos y la necesidad de obtener una seguridad a los equipos y al personal que se halla trabajando, si es necesario realizar la instalación de sistemas de protección contra descarga atmosférica.

Puesto que la mayor probabilidad de que un rayo se descargue es en la parte mas alta de una instalación, como la parte más alta de la instalación es la torre de perforación y por o tanto deberá instalarse el elemento de protección contra el rayo en la parte superior de la torre (ver figura 5.1) y en el apéndice A la torre de perforación, para así proteger todos los elementos, equipos y el personal que al sufrir una descarga de esa magnitud podría tener una muerte instantánea, también podría sufrir daños los equipos como: sobre voltajes, sobre corrientes inducidas que podrían quemarse instantáneamente, es así también los elementos

más sensibles a una variación de voltaje como son las tarjetas electrónicas, microprocesadores etc.

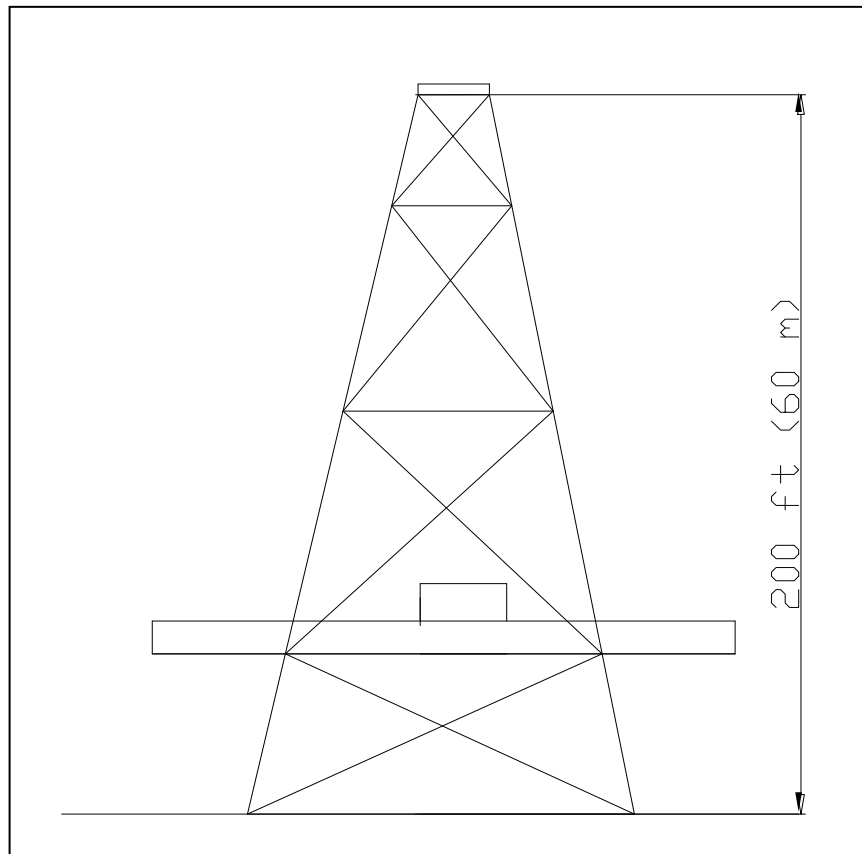


Fig. 7.1. Gráfico de la torre de perforación

5. calculo y determinación de los radios de protección

Alternativa 1.

Como no se dispone de un elemento de protección contra descargas atmosféricas entonces se propone las siguientes alternativas.

Como primer paso, vamos a evaluar la zona de protección basándose en modelo electro geométrico desarrollado por Linck.

Parámetros de diseños y cálculos:

$D_{GFD} = 14.65$ descargas al año en un Km^2

$Y'' = 40$ años.

$h = 60$

Entonces conociendo los valores de Y'' y h ya se puede determinar el valor del radio del área protegida mediante el grafico 2.13. Así tendremos.

$R_p = 60$ m.

Del resultado y en teoría, se tiene que el sistema de protección instalado proporciona una zona de protección suficientemente extensa (véase hojas del anexo C), para proteger a toda el área de la locación de perforación, pero no protege toda el área del Campamento, por lo tanto debemos considerar otras opciones para de esta forma obtener varias soluciones, lo que permite a su vez, de entre estas opciones escoger la más conveniente, en función de costos, facilidad de instalación, etc.

Para conseguir una mayor confiabilidad del sistema de apantallamiento se propone un arreglo de un sistema de pararrayo. Para esta opción se presenta el siguiente diseño:

- A más del sistema de pararrayo instalado en la corona del taladro de perforación, es necesario la instalación de un pararrayo adicional en el campamento a fin de generar traslapes en sus volúmenes de protección. Por lo tanto tener una mayor capacidad de intercepción de los canales de rayos que lleven la dirección de los volúmenes.
- La posición más conveniente de los puntos de captura a de ser los lugares más altos de las estructuras, ya que se tiene la mayor posibilidad de recibir

descargas directas. Los puntos de instalación de los pararrayos será P1 a (60)m, P2 a (15m).

- A continuación empleando los métodos del cono de protección, radios de aproximación, Golde y Linck, se procede a realizar los cálculos de las formas geométricas de las zonas de protección, para saber si es conveniente el sistema propuesto.

Cabe señalar que para la determinación de la zona de protección por los tres primeros métodos, se ha tomado en cuenta un rango de magnitudes de corriente de descarga esperadas superiores a los 10 KA, los cuales tienen un 50% de probabilidad de ocurrencia.

Es evidente que una protección 100% efectiva es virtualmente imposible y ciertamente no es económicamente práctico, un valor del 93% es aceptable.

Calculo de la zona de protección por el método del cono de protección.

Parámetros de diseño:

Pararrayos P1:

Longitud de la varilla Franklin 1.5m.

Altura del pararrayo $h_p 1 = 1.5$ m.

Altura de la estructura sobre el nivel del suelo (corona del taladro) $h_{E1} = 60$ m.

Altura total sobre el plano del suelo $h_1 = h_{p1} + h_{E1} = 60 + 1.5 = 61.5$ m.

Pararrayos P2

Longitud de la varilla Franklin 1.5 m.

Altura del pararrayo $h_p 1 = 1.5$ m.

Altura de la estructura sobre el nivel del suelo $h_{E1} = 10$ m.

Altura total sobre el plano del suelo $h_1 = h_{p1} + h_{E1} = 15 + 1.5 = 16.5\text{m}$.

Con los datos recogidos se procede a realizar los cálculos respectivos:

Para el pararrayo P1.

$$r = h_1; r = h_1 \times \tan 45^\circ, \text{ o sea, } r = 61.5 \quad \text{Ec 2.14 Pg 44}$$

$$r = 50.8 \times h^{0.293} = 50.8 \times (201.77)^{0.293} = 240.53 \text{ pies} = 73.31 \text{ m} \quad \text{Ec 2.15 Pg 44}$$

Para el pararrayo P2.

$$r = h_1; r = h_1 \times \tan 45^\circ, \text{ o sea, } r = 16.5 \quad \text{Ec 2, 14 Pg 44}$$

$$r = 50.8 \times h^{0.293} = 50.8 \times (54.13)^{0.293} = 163.6 \text{ pies} = 49.85 \text{ m} \quad \text{Ec 2.14 Pg 44}$$

Nótese que la zona de protección es función de la altura de la estructura (torre + mástil).

Estos radios de protección están graficados en el Anexo C.

- **Cálculo de la zona de protección por el método de Golde.**

Parámetros de diseño:

Nivel de protección estándar del 93 %, según la recomendación de la tabla 2.3

Nivel de bloqueo inferior recomendado 10 KA. Tabla 2.3

Carga del canal de conducción de 1 Culomb, valor obtenido de la tabla 2.5.

Radios de atracción Di 40 m aproximadamente, obtenido a partir de la curva de la figura 2.9.

Para el pararrayo P1.

Cumple con la condición $D_i < h$

Entonces: $r = 40$ m.

Para el pararrayo P2.

Cumple con la condición $D_i > h$.

$$r = (2 \cdot D_i \cdot h - h^2)^{1/2}$$

$$r = (2 \times 40 \times 11.5 - 11.5^2)^{1/2}$$

$$r = 28 \text{ m.}$$

Nótese que los radios de la base del cilindro de protección no proporcionan suficiente protección contra descargas directas, pero debe tenerse en presente que cada elemento captor atrae rayos y al hacerlo en mayor número, mayor será la probabilidad de caída del rayo sobre el área protegida.

Alternativa. 2.

La instalación del sistema PREVETRON

la primera observación para la instalación sería llevada a determinar:

1. Determinamos el nivel de protección

Para determinar los niveles de protección primeramente calculamos (**Nd**)

$$N_d = N_g \text{ max.} \times A_e \times 10^{-6}/\text{año.}$$

La densidad promedio de descargas anualmente en la región donde la estructura es localizado es de 14.65 descargas de rayos por año por Km^2 .

Para determinar el Área de toda la estructura la cual esta definida como el área sobre la superficie de la tierra.

$$A_e = 9 \times \pi \times H^2 = 9 \times 3.14 \times 60^2 = 101736 \text{ m}^2$$

Luego de terminamos el valor de N_d .

$$N_d = N_g \text{ max.} \times A_e \times 10^{-6} / \text{descargas al año.}$$

$$N_d = 14.65. \times 101736 \times 10^{-6} / \text{descargas al año.}$$

$$N_d = 1.49 \text{ descargas a año}$$

Luego Determinamos las consecuencias de un rayo sobre la estructura. **(Nc)**

Para calcular el valor de N_c suponemos que el equipo de perforación tiene un grado alto de inflamabilidad, requiere de servicio continuo y además frente a las consecuencias del rayo es bastante contaminante para el medio ambiente en caso de un incendio, por lo tanto utilizaremos los valores de las tablas 5,1 5,2 5,3 5,4.

$$C = 3 \times 1 \times 1 \times 5 = 15. \quad E_c (5.5)$$

$$N_c = 5.5 \times 10^{-3} / 15 = 0.0011 \quad (5.4)$$

El sistema de protección diseñado debe reunir todas las especificaciones dadas en la norma para el nivel de protección.

Luego determinamos el nivel de protección

$$E \geq 1 - N_c / N_d. \geq 1 - 0.001 / 1.49 \geq 0.989$$

Entonces el nivel de protección es el tercero (III) y el más alto puesto que el equipo está en una zona de alta densidad de rayos a tierra.

2. Determinación de los radios de protección

$$R_p = \sqrt{[h(2.D - h) + \Delta L(2.D + \Delta L)]} \quad (2.6)$$

$$\Delta L = V \times \Delta t \quad (2.7)$$

$$\Delta L = V \times \Delta t = 1 \text{ m} / \mu\text{s} \times 50 \mu\text{s} = 50 \text{ m}$$

$$R_p = \sqrt{[h(2.D - h) + \Delta L(2.D + \Delta L)]}$$

$$R_p = \sqrt{[60(2 \times 60 - 60) + 50(2.60 + 50)]}$$

$$R_p = 110 \text{ m de radio.}$$

Este radio de protección se ilustra en el gráfico del anexo C.

PUESTAS A TIERRA.

1. LEVANTAMIENTO DEL PLANO DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

El plano físico y eléctrico del equipo de perforación en el cual incluye todos los elementos a proteger incluyendo el campamento, están en el Anexo A

Los equipos eléctricos que se tiene en el taladro de perforación son:

Top Driver. (motor de perforación de 400 KW DC)

Mud Pump. (Bombas de lodo 400 KW DC)

Draw Work (Malacates)

Mixer (mezcladoras de lodo)

Bombas de agua.

Compresores.

Transformadores.

Generadores Cat D398.

Casetas del SCR.

Todos estos equipos se encuentran en el diagrama unifilar del anexo A.

2. MEDICIONES DE LA RESISTIVIDAD REALIZADA EN EL RIG 132

a. Resistividad del suelo. Las pruebas de resistividad que se realizaron en el oriente fueron hechas en la ciudad del Coca en el Campamento base de la compañía, para tener como referencia de los datos que se midieron en el sitio, para realizar luego el diseño del electrodo de puesta a tierra.

Los materiales utilizados para realizar estas mediciones son:

Un Megger industrial DET 5/4 de cuatro bornes ver figura (5.6), proporcionado por la empresa eléctrica Quito para la medición de la resistividad.

4 electrodos de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19mm), por 0.4m. de longitud ver figura (6.2), que cumple con la recomendación $H = 1/20$ de L . donde $L = 8$ m y $H = 0.4$ m.

4 cables flexibles #14 AWG de 10m. De longitud para conectar las piquetas a los bornes del instrumento. Se ha considerado una distancia L igual a 8m.

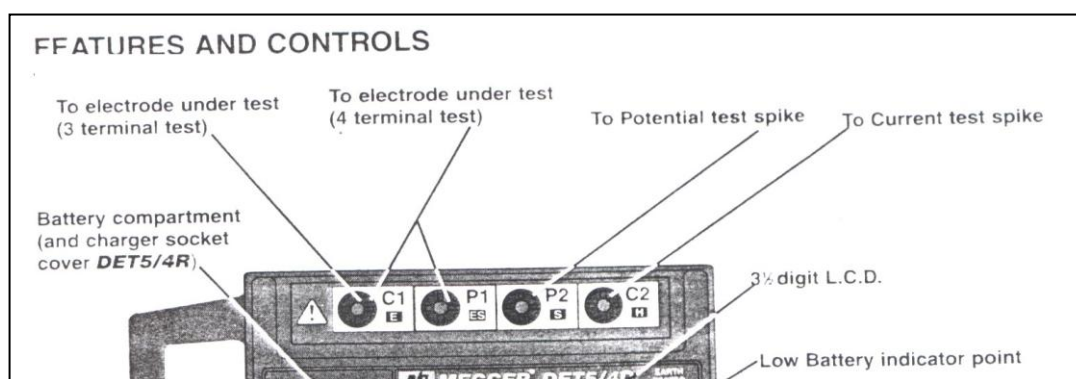


Fig 7.2 Megger DET 5/4 R Utilizado para medir la resistividad de la tierra.

Este dispositivo permite medir la resistencia de un electrodo enterrado, resistividad utilizando el método de Wenner, tensiones de paso y de toque.

Las características de este equipo se describen a continuación.

Máximo voltaje de operación = 50 Vdc.

Frecuencia de prueba = 128 Hz \pm 0.5 Hz

Corriente de prueba = 20 Ω 10mA ac.r.m.s.

200 Ω 10mA ac r.m.s.

2 K Ω 100 μ A ac r.m.s.

voltaje de interferencia de 40 V pico-pico a 50Hz, 60Hz, 200Hz o 16.2/3 Hz.

El máximo error en este equipo es por el ruido eléctrico, el mismo que se encuentra en el orden del 2%.

Elemento de protección IP54.

Rango de temperatura. -20° C a + 45° C

Humedad de operación 90% máx a 45° C

Flash de prueba 2.3 KV ac.

Voltaje de resistencia. Si en cualquier instante de falla, el equipo pudiese resistir de 240Vac. Aplicados entre dos terminales.



FIG. 7.3 Hincado de los electrodos en el campo para medir la resistividad.

Las pruebas que se realizaron en el campo dieron como resultados datos casi similares, debido a que la tierra en el Oriente las tierras son casi homogéneas, el procedimiento para medir la resistividad del suelo se efectuó de acuerdo con los pasos señalados anteriormente, el mismo que se puede observar en la figura (6.3).

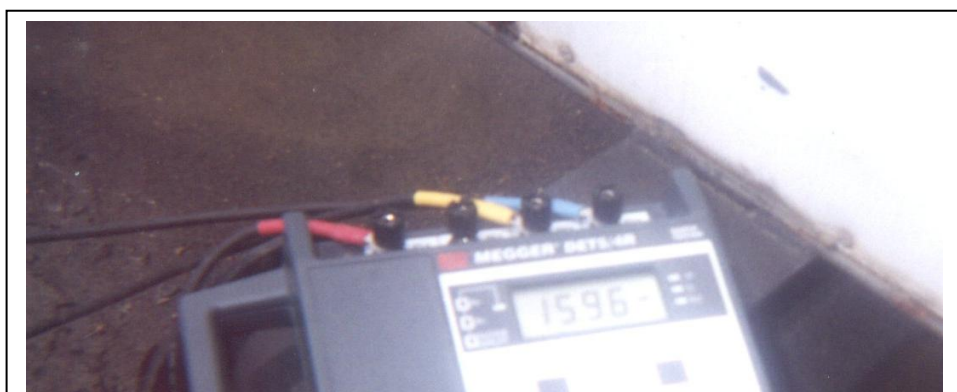


FIG: 7.4 Una de las varias Medidas de la resistividad.

Las lecturas obtenidas constan en el cuadro siguiente.

| REGISTRO DE LA RESISTIVIDAD DE VARIOS SITIOS EN EL COCA | |
|--|---|
| REGISTRO DE MEDICION DE LA RESITIVIDAD | |
| # De Pruebas | Lectura del Aparato ($\rho(\Omega\text{-m})$) |
| 1 | 9.7 |
| 2 | 9.63 |
| 3 | 9.8 |
| 4 | 9.75 |
| 5 | 9.53 |
| Factor K= 50.26 | Σ 48.41 |
| Distancia L= 8m | ρ 9.68 |

TABLA (7.1)

Para el presente estudio la resistividad promedio es de 9.68 ($\Omega\text{-m}$), que es excelente para una instalación de puesta a tierra. De acuerdo a la guía de la tablas (3.1) corresponde a un terreno de naturaleza Arcilla (suelo orgánico, húmedo).

3. CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA FASE TIERRA.

Todos los valores de potencia, voltaje, corriente y los valores de reactancia son sacados de las placas de datos de los equipos.

GENERADOR 1 (1.2 MVA)

$$MVA_{G1} = MVA / Z_{PU}$$

$MVA_{G1} = 1.2 / 0.12_{PU}$ Dato extraído de la placa de datos de los generadores (Ver Anexo A)

$$MVA_{G1} = 10 \text{ MVA}$$

$$MVA \text{ Gen } 1 = MVA \text{ Gen } 2 = MVA \text{ Gen } 3 = MVA \text{ Gen } 4.$$

TRANSFORMADOR 1 (0.5 MVA)

$$MVA_{T1} = MVA / Z_{PU}$$

$MVA_{T1} = 0.5 / 0.1_{PU}$ Dato extraído de la placa de datos del transformador (Ver Anexo A)

$$MVA_{T1} = 4.16 \text{ MVA.}$$

$$\text{Trans } 1 = \text{Trans } 4$$

TRANSFORMADOR 3 (0.150 MVA)

$$MVA_{T2} = MVA / Z_{PU}$$

$MVA_{T2} = 0.150 / 0.07_{PU}$ Dato extraído de la placa de datos del trans (Ver Anexo A)

$$MVA_{T2} = 2.14$$

GRUPO DE MOTORES DEL TRANSFORMADOR DEL T 4

$$P = 40\text{Hp} * 746 \text{ W} / 1 \text{ Hp}$$

$$P = 29827.99 \text{ W}$$

$$S = P / \cos \varphi = 29827.99 \text{ W} / 0.85$$

$$S = 0.0350 \text{ MVA}$$

Como en los motores no tenemos la reactancia subtransitoria entonces podemos calcular mediante la corriente nominal dividiendo para la corriente de arranque que es de $5I_n$.

$$Z_{PU} = I_n / 5I_n$$

$$MVA_{M1} = MVA / Z_{PU}$$

$$MVA_{M1} = 0.035 / 0.2 \text{ pu}$$

$$MVA_{M1} = 0.175$$

$$MVA_{M2} = 0.145 \text{ MVA.}$$

$$MVA_{M3} = 0.877 \text{ MVA.}$$

$$MVA_{M4} = 0.175 \text{ MVA}$$

$$MVA_{M5} = 0.526 \text{ MVA.}$$

GRUPO DE MOTORES DEL TRANSFORMADOR DEL T 1

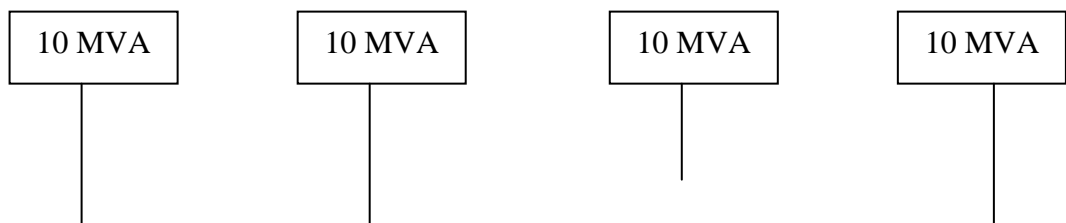
$$MVA_{M1} = 0.175 \text{ MVA}$$

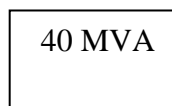
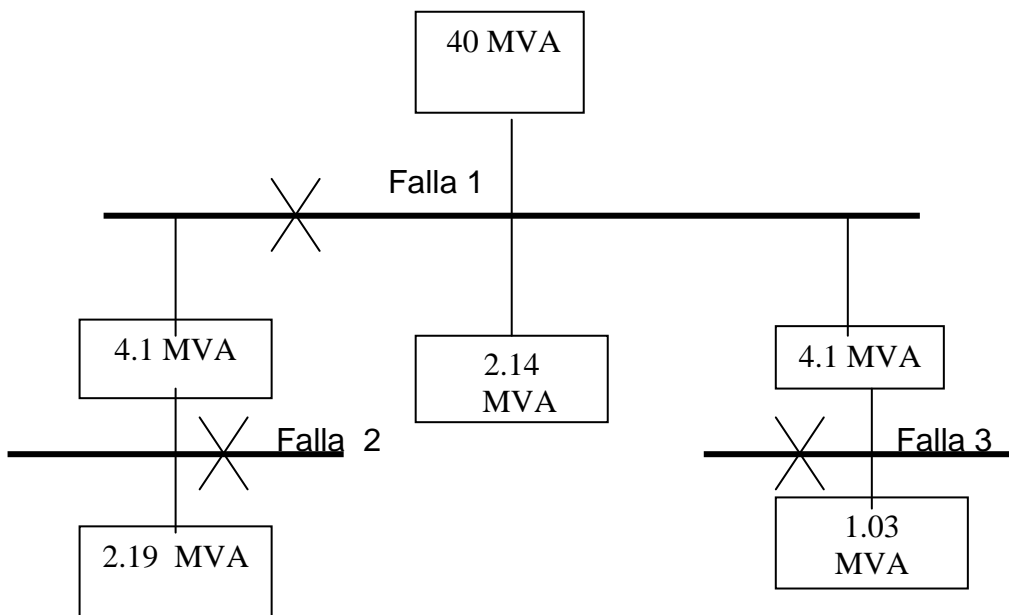
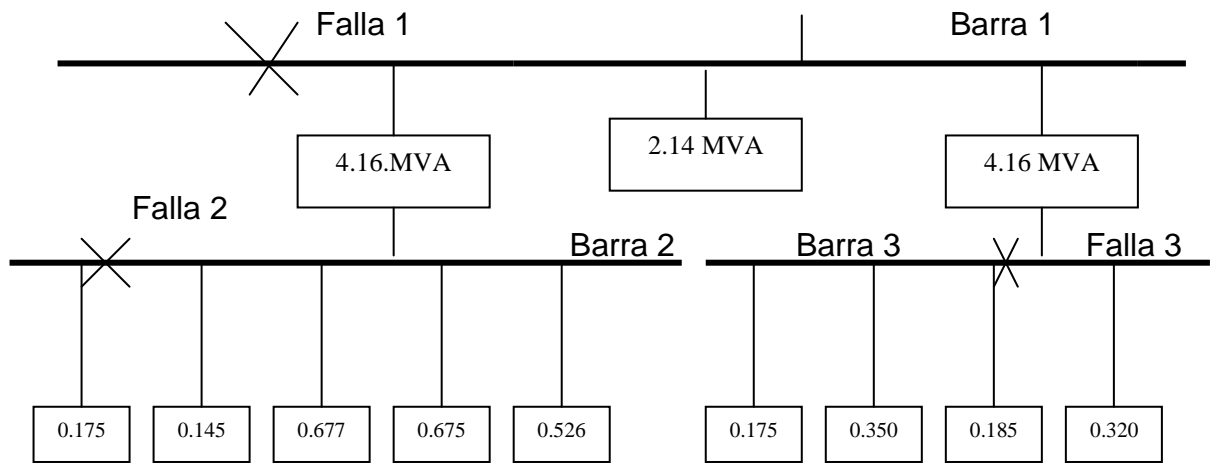
$$MVA_{M2} = 0.350 \text{ MVA}$$

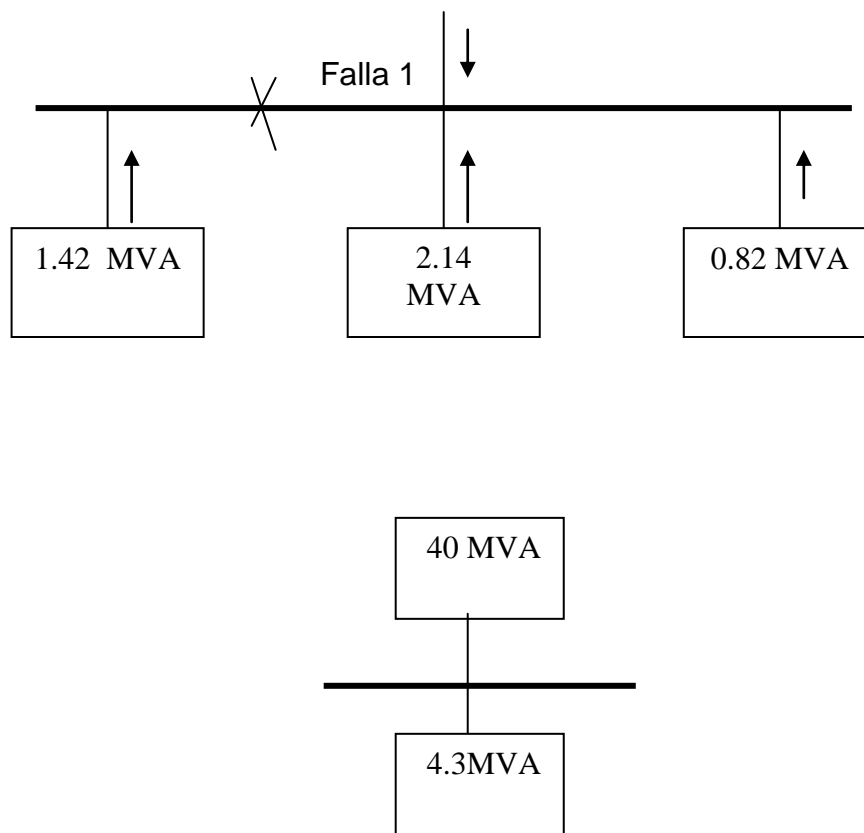
$$MVA_{M3} = 0.185 \text{ MVA}$$

$$MVA_{M4} = 0.32 \text{ MVA.}$$

Corriente de falla fase tierra en la barra 1,2,3.







MVA total = 44.3

Las impedancias de secuencia positiva es igual a la impedancia de la secuencia negativa, para la secuencia cero solo intervienen los elementos que están conectados a tierra y forma el circuito es decir en el circuito que se esta analizando no están conectados los neutros tanto de los generadores como de los transformadores a tierra es decir la impedancia de secuencia cero es igual a cero ($Z_0 = 0$).

| Sec (+) | Sec (-) | Sec (0) |
|---------|----------|----------|
| 44.3MVA | 44.3 MVA | 22.1 MVA |

El valor de la impedancia de secuencia cero tomamos la mitad del valor de la impedancia de secuencia positiva y cero

$$MVA B1 = 1 / (1 / 44.3) + (1 / 44.3) + (1 / 22.1)$$

$$MVA B1 = 10.9$$

$$MVA B2 = 2.07$$

$$MVA B3 = 0.980$$

$$I \text{ de falla B1 } \Phi\text{-T} = (10.8 * 1000000) / \sqrt{3} * 600.$$

$$I \text{ de falla B1 } \Phi\text{-T} = (43200000) / 1038$$

$$I \text{ de falla B1 } \Phi\text{-T} = 10404 \text{ A.} = 10.4 \text{ KA.}$$

$$I \text{ de falla B2 } \Phi\text{-T} = 1.99 \text{ KA.}$$

$$I \text{ de falla B3 } \Phi\text{-T} = 944.2 \text{ A.}$$

4. DETERMINACIÓN DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE PUESTA A TIERRA.

Para una mejor comprensión de la situación actual del sistema de tierra, se procede a elaborar los correspondientes diagramas enfilares, cuyos planos se presenta en el anexo A de acuerdo a las inspecciones realizadas y por la información adquirida por los planos del sistema eléctrico proporcionado por la compañía. Se considera oportuno citar los problemas que se presentan en el taladro luego de la revisión efectuada.

- Las conexiones a tierra de los Skid (carcasa) se los hace independientemente lo cual no es técnicamente adecuado, se debe conectar todas las carcasas a un solo punto tratando de formar un solo punto equipotencial de manera que no exista peligro para el personal en caso de falla.

- Al no disponer con el diseño de una malla, que sería lo adecuado para el sistema eléctrico del equipo tanto para tener una buena referencia, disipar la corriente de falla, de una descarga atmosférica sin exponer en peligro el equipo ni al personal se considera prudente realizar un diseño de una nueva toma de tierra que presente una resistencia de puesta a tierra que este entre 1 y 5 Ohmios que sugiere la norma St 80 de la IEEE de Grounding System.

En la practica, se recomienda tener un solo punto de puesta a tierra para toda la central o locación. La situación que presenta las locaciones donde se instala los equipos de perforación es que es demasiado pequeño y que solamente permanecerá en ese sitio durante 2 a 3 meses como máximo, también los equipos de potencia como motores, generadores, transformadores, están diseñados para trabajar un sistema de neutros flotantes o aislados. Razón por la cual no se puede realizar el diseño de puesta a tierra es solamente para protección del personal y del equipo por lo cual el diseño e instalación de una malla de tierra sería demasiado.

Sin embargo se presenta un ejemplo de un diseño de una malla de tierra.

5. CALCULO DE LA RESISTENCIA PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES.

a) Con varillas Sencillas

Parámetros de diseño y cálculos:

$\rho = 9.68 \Omega\text{-m}$ ver sec.(3.2.1) Proceso de medición de la resistividad

Longitud del electrodo $h_2 = 1.8 \text{ m}$

Diámetro del electrodo $d_2 = 5/8" = 0.0158 \text{ m}$.

$n = 1$

$H_1 = 2 \times h_2 = 2 \times 1.8 = 3,6$.

$K = 1.25$ tomadas del grafico 4.2

$$R_v = [\rho / (2 \cdot \pi \cdot h_2)] \times \ln [(4 \cdot h_2 / d_2) - 1] \quad \text{Ec (4.1) pg 108}$$

$$R_v = [9.68 / (2 \cdot \pi \cdot 1,8)] \times \ln [(4 \cdot 1,8 / 0,0158) - 1]$$

$$R_v = 5.23 \quad \Omega$$

$$R_{nv} = (R_v \cdot K_1) / 2 \quad \text{Ec (4.4) Pg 109}$$

$$R_{nv} = (5.23 \times 1,25) / 2.$$

$$R_{2v} = 3.26 \quad \Omega$$

Luego de haber realizado el estudio se puede determinar que con un arreglo a las varillas conectadas en forma de triángulo.

b. Varillas conectadas en triángulo.

$$R = \left| \frac{\rho}{(2 \cdot \pi \cdot h_2)} \right| \times \left| \ln(2 \cdot h_2 / A) \right| \quad \text{Ec (4.5). Pg 111}$$

$$R = \left| \frac{9.68}{(2 \cdot \pi \times 2)} \right| \times \left| \ln(2 \times 2 / 0.65) \right|$$

$$R = 1.4 \quad \Omega.$$

$$A = 3 \sqrt{(d_2 / 2 \times S^2)} \quad \text{Ec (4.6) Pg 112}$$

$$A = 3 \sqrt{(0.0076 \times 2.5^2)}$$

$$A = 0.65 \text{ m.}$$

C. Con Varillas Químicas (Chem-Rod): para esta opción, se acondiciona el suelo. Así, se estima un hoyo de 1 pie (0,30 m) de radio y lleno con GAF.

Parámetros de diseño y cálculos:

$$E = 0.68 \text{ constante del efecto de la interacción con la tierra dentro del HI sec(4.4)}$$

Pg 113.

$$\rho_{\text{GAF}} = 0.8 \quad \Omega\text{-m}$$

Longitud del electrodo $h_2 = 10 \text{ pies} = 3 \text{ m.}$

Diámetro del electrodo $d_2 = 2,5'' = 63,5 \text{ mm.}$

$$R_{vqa} = \left| \frac{(E \rho_{\text{GAF}} + (1-E) \cdot \rho)}{(2 \cdot \pi \cdot h_2)} \right| \times \left| \ln(4 \cdot h_2 / d_2) - 1 \right|$$

$$R_{vqa} = 0.2 \left| \frac{((0,68)(0,8) + (0.32).9,68) / (2.\pi.3)} \right| \times \left| \ln(4x3/0,0635) - 1 \right|$$

$$R_{vqa} = 0.189. \Omega$$

De acuerdo con lo especificado por el fabricante tal valor se alcanza de pocas semanas.

d. Diseño de la malla de tierra.

A continuación, dentro de esta alternativa, se presenta los cálculos de la resistencia a tierra. Para el diseño de una malla de tierra debemos seguir los pasos descritos en la sección (4.5).

1. Determinación de configuración inicial de la malla.

El área de la donde se va a instalar la malla de tierra es de 63 x 84. = 5292 m². Entonces el área de la malla es de $A = 70 \times 70 = 4900 \text{ m}^2$.

Luego determinamos la configuración de la malla que se muestra en la figura 6.4.

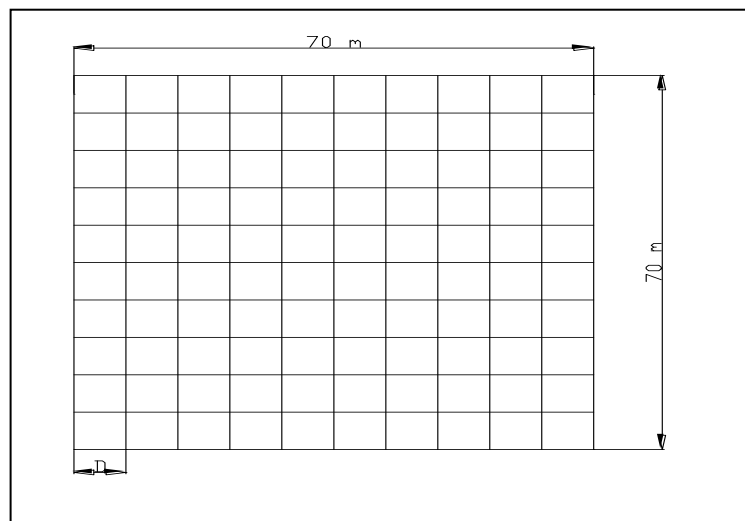


Fig. 7.5 Ejemplo de un diseño de malla

Luego calculamos N.

$$N = \sqrt{(N_a \times N_b)} \quad \text{Ec (4.10)}$$

$$N = \sqrt{(10 \times 10)} = 10.$$

Entonces la separación entre conductores será de 7 m.

$$D = 7 \text{ m}$$

Luego calculamos la longitud total de conductor enterrado.

$$L = 2 \times 11 \times 70 = 1540 \text{ m de conductor.}$$

La profundidad a la que va a ir la malla de tierra es de 0.5 m.

2. Selección de conductores

Para determinar la sección del conductor podemos calcular con la ecuación (4.11), pero por lo general una malla de tierra típica para una subestación puede comprender, cable de cobre desnudo calibre 4 / 0 AWG, tanto para no dar lugar a las fallas mecánicas de los conductores.

$$A = (I) / \sqrt{\{ \text{Ln} [(T_m - T_a) / (234 + T_a)] + 1 \} / 33.t} \quad \text{Ec (4.11)}$$

$$A = (I) / \sqrt{\{ \text{Ln} [(1083 - 36) / (234 + 36)] + 1 \} / 33 \times 2}$$

$$A = 500675 \text{ circular mil.}$$

Este tamaño de conductor es demasiado grande por lo que. La Sección del cable de cobre para este ejemplo se tomará de 4/0 AWG = 107,22 mm².

$$\text{Diámetro del cable } d_1 = 23.37 \text{ mm} = 0.0233 \text{ m.}$$

3. Calculo de la resistencia de puesta a tierra.

Método de Laurent.

$$R_m = \rho \left[1 / L + \sqrt{(20.A)} \right] \times \left[1 + 1 / (1 + h_1 \sqrt{(20 / A)}) \right] \quad \text{Ec (4.12).}$$

$$R_m = 9.68 \left[1 / 1540 + \sqrt{(20. 4900)} \right] \times \left[1 + 1 / (1 + 0.5 \sqrt{(20 / 4900)}) \right]$$

$$R_m = 9.64 (0.00753) = 0.0729 \Omega$$

6. CALCULO DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL.

Primeramente calculamos El voltaje de paso (ED) y voltaje de paso (Es).

$$ED = (116 + 0.174 \rho s) / \sqrt{t}.$$

$$ED = (116 + 0.174 \times 2500) / \sqrt{3s}.$$

$$ED = 318 \text{ V}$$

$$Es = (116 + 0.7 \times \rho s) / \sqrt{t}.$$

$$Es = (116 + 0.7 \times 2500) / \sqrt{3}$$

$$Es = 1078 \text{ V}.$$

Calculo del máximo aumento del potencial de la red.

$$Um = (Km \times Ki \times \rho \times I) / (L + 1.2 \times Lr). \quad Ec \quad (4.17)$$

$$Km = (1 / 2 \pi) [\text{Ln} (D^2 / 16xhxd) + 1 / \pi \text{Ln} (3 / 4) (5 / 6) (7 / 8)]. \quad Ec \quad (4.18)$$

$$Km = (1 / 2 \pi) [\text{Ln} (7^2 / 16 \times 0.5 \times 0.0233) + (1 / \pi) \text{Ln} ((3 / 4) (5 / 6) (7 / 8))].$$

$$Km = 0.93$$

$$Ki = 0.656 + 0.172n. \quad Ec \quad (4.19)$$

$$Ki = 0.656 + 0.172 \times 10$$

$$Ki = 2.37$$

$$Um = (Km \times Ki \times \rho \times I) / (Lc + 1.2 \times Lr).$$

$$Um = (0.93 \times 2.37 \times 9.68 \times 10000A) / (1540).$$

$$Um = 138.54 \text{ V}$$

Calculo de la diferencia de potencial en el piso en el exterior inmediato a la red

$$K_s = (1 / 2\pi) [\frac{1}{2}(h) + 1 / (D + h) + 1/D (1 - 0.5^{n-2})] \quad E_c \quad (4.22)$$

$$K_s = (1 / \pi) [\frac{1}{2}(0.5) + 1 / (7 + 0,5) + 1/7 (1 - 0.5^{10-2})]$$

$$K_s = 0.167.$$

$$U_s = (K_s \times K_i \times \rho \times l) / L \quad E_c \quad (4.20)$$

$$U_s = (0.167 \times 2.37 \times 9,68 \times 10000) / 1540$$

$$U_s = 24.37 \text{ V}.$$

Por lo tanto la tensión de la red no excede del potencial permisible entonces, la malla si esta diseñada bajo todos los parámetros mencionados anteriormente, y no hay que realizar ningún rediseño de la malla.

De los resultados obtenidos teóricamente se puede establecer que el uso de los electros activos remplaza con mucha ventaja a los sistemas tradicionales ya que garantizan que se tenga en forma permanente una resistencia de puesta a tierra baja, pero esta solución es apropiada en sitios donde la resistividad del terreno es demasiado alto, en lugares secos, rocosos, lo cual seria una muy buena alternativa.

Si bien, la instalación de la malla de puesta a tierra es también una buena alternativa pero como no se presta las condiciones adecuada para su instalación es aconsejable la instalación de electrodos activos que reduce la resistencia en un 50% menos que las otras.

También otra solución es el diseño la malla triangulada, solamente con tres varillas copperweld interconectadas con un conductor denudo de cobre. Con este diseño si bajamos la resistencia a valores muy bajos y no utilizamos mayor espacio, es transportable en el momento cambio de sitio podemos desconectar, sacar las varillas y llevar a cualquier otro sitio.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

En base al estudio realizado, se puede extractar entre otras cosas las siguientes conclusiones:

En todas estaciones pequeñas grandes donde exista la presencia de la energía eléctrica es necesario un sistema de puesta a tierra por razones de seguridad del personal y del equipo, y para asegurar un funcionamiento correcto de cada uno de los elementos que se utiliza en los taladros de perforación.

En general, una instalación de puesta a tierra se consigue enterrando una o varias varillas de cobre, o una malla también de cobre en el terreno, y desde allí interconectando esta referencia hasta los equipos que se requieran, evidentemente, la instalación de la tona de tierra tendrá como objetivo central, más seguro y efectivo.

Las lecturas que se tomen de la resistencia de puesta a tierra o de la resistividad del suelo debe ser lo más cercano a la realidad, aun cuando dependerá de las facilidades que preste el lugar. En la práctica, se recomienda efectuar más de una medida, para así asegurar una buena aproximación al valor real. Estas medidas deben realizarse en las condiciones más desfavorables, es decir, en época en que el suelo esté más seco (verano) y si ello no es posible, se deberá aplicar un cierto coeficiente de seguridad que incremente los resultados obtenidos.

Para diseñar un sistema de puesta a tierra en primer lugar se debe realizar los estudios correspondientes, relacionados o equipos a ser aterrizados; elección, dimensiones y disposición del tipo de electrodo(s) a usar de acuerdo a las características del suelo y a la resistencia de toma de tierra recomendada.

Para estaciones de perforación petroleras lo ideal sería la instalación de una malla de tierra compuesta por cable desnudo (recuerde que # 2 AWG es el

mínimo), enterrado a una profundidad comprendida entre 0.4 y 1 metro. La malla esta formada por conductores separados de 2 a 6 metros, también se aconseja enterrar varilla copperweld (5/8 pulgadas x 8 pies) en el perímetro exterior y en puntos intermedios de la malla, pero las condiciones ambientales, tiempo, económicas no lo permiten para la instalación de una malla que cubra toda la estación.

Cuando la conductividad del terreno no es buena, se puede mejorar de algunas maneras; variando el contenido químico de la misma añadiendo sal en grano o remplazar el suelo utilizando chocoto, benbonita o GAF como material de relleno. También se puede realizar un acondicionamiento automático del suelo mediante el empleo de varillas químicas (Chem-Rod).

De acuerdo a la norma NEC 250 articulo 250 – 86 esta permitido unir entre sí en un solo punto a diferentes tomas de tierra que se representa en una instalación, como son tomas de tierra que se presenta en una instalación, como son tomas de tierra para la energía eléctrica, tomas de tierra para descargas del pararrayos y tomas de tierra para telecomunicaciones.

En cuanto hace relación a los sistemas de protección contra descargas atmosféricas esto cumple con una acción protectora; es decir, el pararrayos tiene por finalidad atraer para si las descargas y desviarlas a tierra.

Todo sistema de pararrayos debe atender a dos requisitos básicos: protección de las instalaciones y personal contra descargas atmosféricas directas y, establecer un camino fácil para la conducción de las altas corrientes de descarga con un mínimo de resistencia posible.

Un sistema de protección debe asegurar la mayor probabilidad de que el rayo caiga en el pararrayos, que algún otro lugar de la instalación.

Para transportar la corriente de descarga a tierra sin peligro de una descarga lateral se recomienda cables de cobre aislados tipo Triax o TTU.

No se debe perder de vista la recomendación que la toma de tierra tenga una resistencia constante, menor a los 5 ohmios, con lo que se va a conseguir que la instalación este adecuadamente protegida.

Es evidente, que las estadísticas no se pueden dar indicativos atemorizantes para unos o sin importancias para otros, lo realmente importante es considerar que un solo rayo, un solo día del año, puede ocasionar daños incalculables en las instalaciones y equipos.

Para la determinación de la zona de protección se puede aplicar el método tradicional pero que tiene sus limitaciones, ya que la correlación entre altura / base de protección no esta claramente definida. Mientras que el modelo electrogeométrico la evaluación la zona de protección es función de la amplitud de la corriente del rayo esperada (como resultado del concepto de la distancia de impacto), cuya probabilidad de ocurrencia de descarga de una determinada intensidad se expresa en forma de distribución estadística. En consecuencia, para propósitos de diseño son solo valores referenciales ya que pueden variar dependiendo de las propiedades geográficas de la región, altitud de la zona, Proceso de formación del rayo, etc. La forma y tamaño, de la instalación también influye en el diseño.

RECOMENDACIONES:

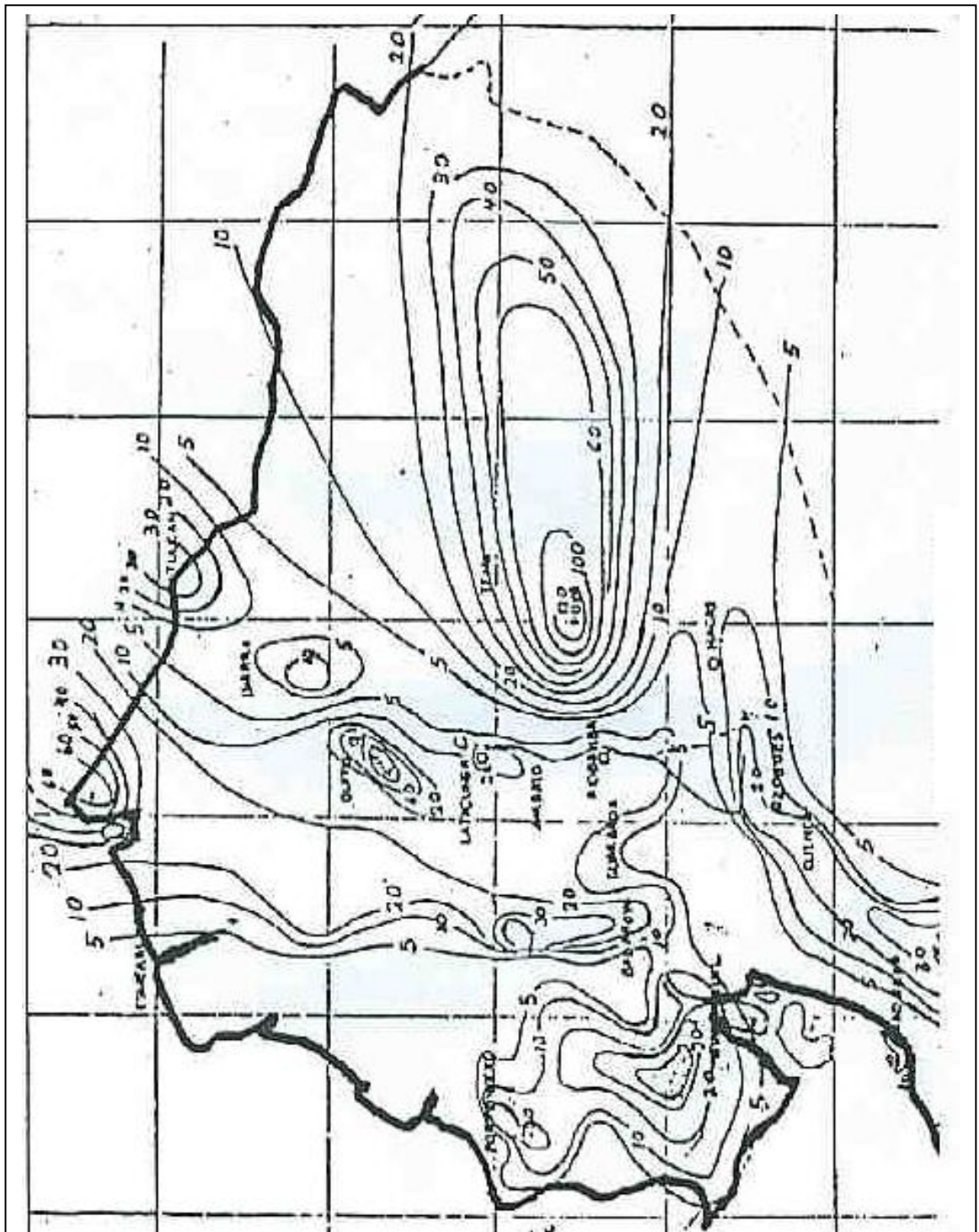
Se recomienda para el sistema de puesta a tierra que el diseño de una pequeña malla conectada en triángulo es bastante confiable para este sistema, debido a que la resistencia de puesta a tierra es baja comparado con los demás y por ende sus potenciales bajos y también por su construcción sencilla, que se puede sacar y poner en cualquier otro lado.

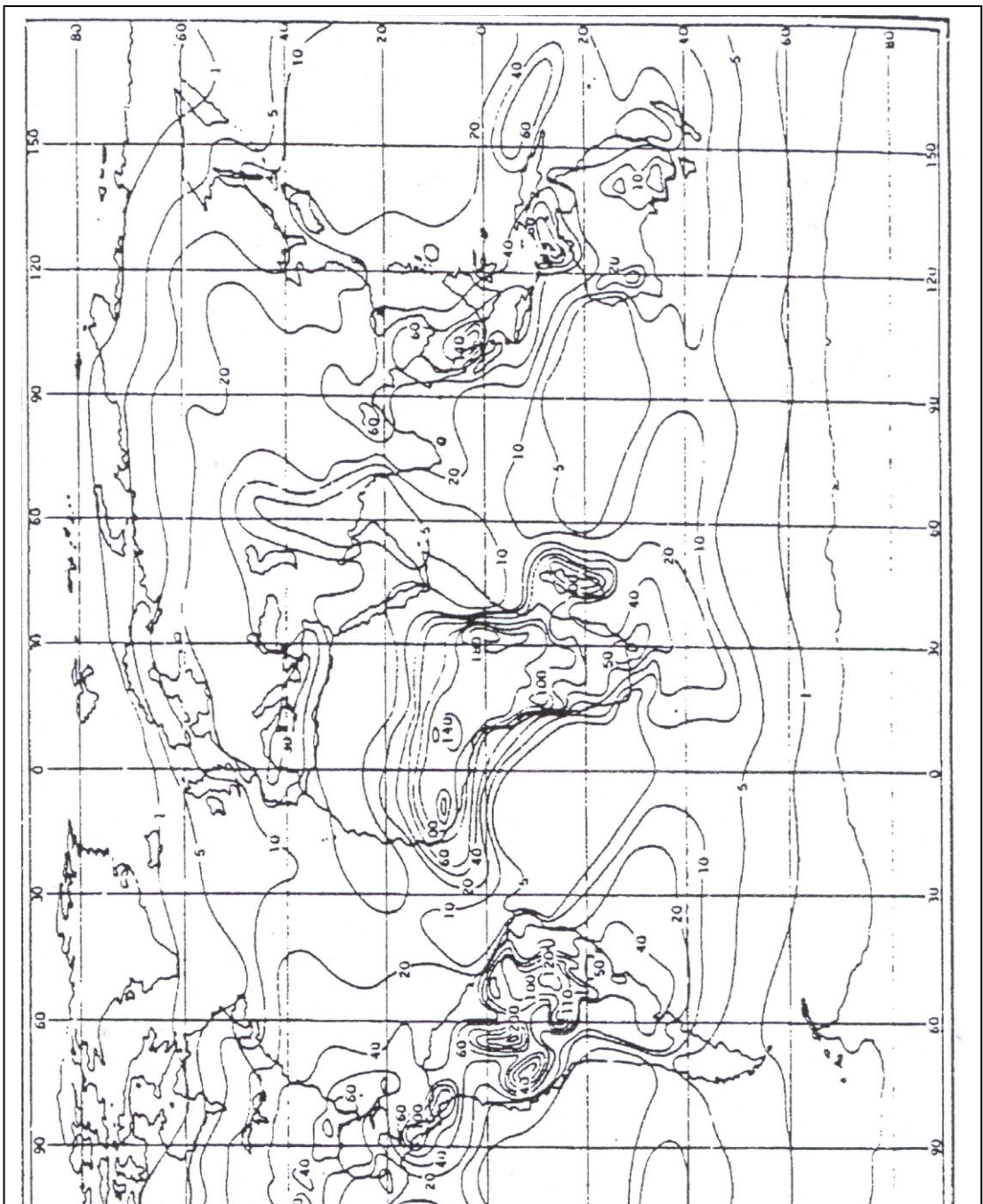
Se recomienda la instalación del pararrayo de nueva tecnología (elemento de ionización) el cual presenta una opción bastante aceptable, debido a que la torre de perforación y toda sus elementos y equipos utilizados para la perforación en el Oriente y el personal deben estar protegidos en caso de que caiga un rayo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Estaciones de transformación, distribución y protección de sistemas eléctricos de la CEAC de Ramírez Vázquez.
2. Stevenson Willan Análisis de sistemas Eléctricos de potencia Graw-Hill.
3. Manuales de Ross Hill (Sisten Drawings Manual) referente a SCR.
4. Manuales de Varco (referente a Top Drive).
5. Estudio de protecciones contra descargas Atmosféricas y puestas a tierra del Centro de Telecomunicaciones Quito. (Tesis de ingeniería de la EPN).
6. Elementos de Diseño de Subestaciones de Enríquez Harper.
7. Normas de la IEEE St 80 de Puestas a Tierra.
8. Norma Francesa NF C 17-102. acerca de apantallamiento.

9. Internet.





DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL.

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA AERONAUTICA.

AEROPUERTO : COCA

AÑO: 2001

LISTADO ANUAL DE PRECIPITACIONES.

| MESES | # DE DIAS DE TORMENTAS | # DE DIAS CON DESCARGAS ELECTRICAS | TEMPERATUIRA PROMEDIO °C | HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO % |
|----------------|-------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|
| Enero | 9 | 4 | 26.5 | 85.62 |
| Febrero | 6 | 1 | 29.65 | 82.3 |
| Marzo | 8 | 5 | 25 | 83.97 |
| Abril | 6 | 4 | 27.1 | 83.64 |
| Mayo | 8 | 3 | 28.54 | 82.5 |
| Junio | 11 | 5 | 29.2 | 84.83 |
| Julio | 13 | 2 | 27.66 | 81.87 |
| Agosto | 14 | 0 | 28.85 | 84.2 |

| | | | | |
|--------------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| Septiembre | 11 | 2 | 25.79 | 82.92 |
| Octubre | 5 | 1 | 28.32 | 80.62 |
| Noviembre | 7 | 3 | 26.56 | 83 |
| Diciembre | 8 | 4 | 26.89 | 81.85 |
| Prom. Total | 106 | 34 | 27.57 | 83.11 |

Tabla. B1 Número de Tormentas Registradas en la ciudad del Coca

DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL.

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA AERONAUTICA.

AEROPUERTO : COCA

AÑO: 2000

LISTADO ANUAL DE PRECIPITACIONES.

| MESES | # DE DIAS DE TORMENTAS | # DE DIAS CON DESCARGAS ELECTRICAS | TEMPERATUIRA PROMEDIO °C | HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO % |
|-------------------|-------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|
| Enero | 12 | 3 | 27.66 | 81.87 |
| Febrero | 8 | 4 | 28.85 | 83.2 |
| Marzo | 11 | 5 | 25.79 | 82.92 |
| Abril | 9 | 2 | 28.32 | 80.62 |
| Mayo | 6 | 1 | 28.56 | 83 |
| Junio | 10 | 2 | 27.89 | 81.85 |
| Julio | 13 | 5 | 27.66 | 84.62 |
| Agosto | 9 | 3 | 28.85 | 82.3 |
| Septiembre | 12 | 3 | 27.79 | 81.97 |

| | | | | |
|--------------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| Octubre | 9 | 4 | 28.32 | 83.64 |
| Noviembre | 12 | 7 | 29.56 | 82.5 |
| Diciembre | 10 | 2 | 27.89 | 86.83 |
| Prom. Total | 119 | 41 | 28.01 | 84.11 |

Tabla. B2 Número de Tormentas Registradas en la ciudad del Coca