

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES DE
UNA SUBESTACION ELECTRICA EN 400 KV
LOCALIZADA EN LA PLANTA DE HYLSA

POR

ING. HILARIO GARCIA GONZALEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2000

TM

Z5853

.M2

FIME

2000

G373

PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS DE

UNA SUBESTACION ELECTRICA EN LA PLANTILLA DE HYLISA

400KV

H.G.G.



1020145441

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES DE UNA SUBESTACIÓN
ELECTRICA EN 400KV LOCALIZADA EN LA PLANTA DE HYLSA

POR

ING. HILARIO GARCIA GONZALEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

MONTERREY N. L. DICIEMBRE 2000

0150-07360

TH
Z5853
•H2
FINE
2000
G373.

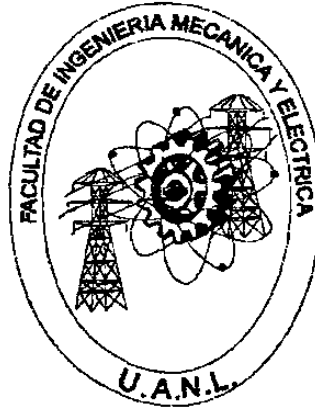


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES DE UNA SUBESTACIÓN
ELECTRICA EN 400KV LOCALIZADA EN LA PLANTA DE HYLSA

POR

ING. HILARIO GARCIA GONZALEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA


MONTERREY N. L. DICIEMBRE 2000


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE PORT-GRADO

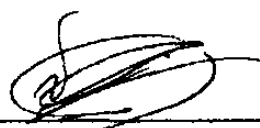
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **Protección contra sobretensiones de una subestación eléctrica en 400KV localizada en la planta de HYLSA**, realizada por el alumno **Ing. Hilario García González**, matrícula 0122502 sea aceptada para su defensa como opción al grado de **Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Potencia**.

El comité de Tesis


Asesor
M.C. Enrique López Guerrero


Coasesor
M.C. Félix González Estrada


Coasesor
M.C. Evelio P. González Flores


Vo.Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-Grado

San Nicolás de los Garza, N.L. a Diciembre de 2000

A MIS PADRES:

Que con su ejemplo de amor, lealtad, coraje y respeto, supieron darme la educación, los valores y la responsabilidad en el cumplimiento de nuestros compromisos, a ellos gracias, una palabra tal vez muy pequeña y fácil de decir, pero que encierra un inmenso significado para todos aquellos que como yo, hoy en día son padres.

Sr. Hilario García González (+)
Sra. Rebeca González de García (+)

MI FAMILIA:

A mi esposa e hijos quienes me impulsaron para que no renunciara al proyecto de realizar esta tesis, que a parte de incrementar mi nivel de educación es una satisfacción personal que llena parte de mis expectativas de la vida.

Alma Delia Serrano de García
Alma Nelly
Luis Gerardo
Mayra Alejandra

MI ASESOR:

Que con su ayuda y experiencia ha sido posible desarrollar éste trabajo, como parte importante en el logro de algunas de mis metas personales, pero sobre todo con la demostración de amistad y cariño que siempre a prevalecido hacia un servidor y en particular a mis padres.

M. C. Enrique López Guerrero

PROLOGO

En virtud del hecho natural que exige en la actualidad un mundo que, si no lo esta, ya se encuentra en el proceso de globalización, esto nos obliga a establecer en todo desempeño un cumplimiento total de las nuevas normas de calidad y diseño. El campo de la ingeniería no podía ser excluido, y en lo que concierne a la especialidad de la potencia eléctrica y en particular a las subestaciones eléctricas, las cuales soportan básicamente el total o parcial peso del funcionamiento de la industria, es necesario por lo tanto tener que incrementar nuestra atención en lo concerniente a la forma o manera de conducirnos en nuestro desarrollo personal y profesional.

Las exigencias que demanda esta evolución tecnológica, en particular en lo que corresponde a la rama de la potencia eléctrica hacen que a la hora de ponernos a desarrollar un proyecto, este refleje los avances y exigencias que la modernidad establece. Esto se logra aplicando al pie de la letra las normas y reglamentos que debe tener todo tipo de instalación eléctrica.

Por lo tanto el orden y la disciplina que pongamos en nuestro trabajo serán reflejados en lo que obtengamos como proyecto; por eso con la preparación que sigamos manteniendo y la habilidad e ingenio para adquirir o buscar la información de las nuevas tecnologías aplicadas a los eventos que desarrollamos cada día, será una base sólida para iniciar y mantener una larga vida de logros que reflejan a una persona que además de ser un profesional en su trabajo es un emprendedor generador de empleos para beneficio del su país.

Ing. Hilario García González

INDICE

	PAG.
SINTESIS	1
1. INTRODUCCIÓN.	3
1.1.Descripción del problema	3
1.2.Objetivo	4
1.3.Hipótesis	4
1.4.Limites del problema	4
1.5.Justificación	4
1.6.Metodología	5
1.7.Revisión bibliográfica	5
2. ANTECEDENTES	7
2.1.Origen de las sobretensiones	7
2.2.Sobre tensiones de origen atmosférico	7
2.3.Disturbios en la línea debido al cierre y apertura de interruptores	14
2.4.Contacto con líneas de mayor potencial	15
2.5.Fallas a tierra	16
2.6.Efecto de resonancia	17
2.7.Fallas intermitentes	20
3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSION	22
3.1.Pararrayos	23
3.2.Apartarrayos	25
3.3.Sistema de tierras	28
3.4.Interruptores y relevadores	32
4. NORMAS, ESPECIFICACIONES Y DEFINICIONES	38
4.1.Norma oficial mexicana (NOM-001-SEMIP-1999)	38
4.2.Definiciones	42
4.3.Especificaciones	45
5. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	47
5.1.Descripción, localización, y condiciones del sistema de protección	47

5.1.1. Equipo de la subestación	47
5.1.2. El edificio	48
5.2. Localización	48
5.2.1. Ubicación de la subestación	48
5.3. Condición actual del sistema de protección	49
5.3.1. Pararrayos	49
5.3.2. Apartarrayos	49
5.3.3. Sistema de tierras	49
6. DISEÑO	51
6.1. Criterios de diseño	51
6.2. Estudio GEO-técnico (Resistividad Elec. del Terreno)	55
6.2.1. Estudio y medición de la resistencia eléctrica	55
6.2.2. Metodología de uso común	57
6.3. Estudio de corto circuito	61
6.4. Selección de protecciones	63
6.4.1. Apartarrayos	63
6.4.2. Pararrayos	73
6.4.3. Malla de tierra	81
6.5. Procedimientos para medir u obtener:	87
6.5.1. Potenciales de paso y de contacto	87
6.5.2. Elevación máxima del potencial de malla	90
6.5.3. Potencial de paso en la periferia de la malla	92
6.5.4. Potencial de transferencia	94
7. ÉL CALCULO	95
7.1. Características del suelo	95
7.2. Máxima corriente a tierra	95
7.3. Diseño preliminar del sistema de tierras	95
7.4. Resistencia a tierra del sistema	95
7.5. Incremento máximo del potencial de la malla	96
7.6. Potencial de paso en la periferia	97
7.7. Investigación de los potenciales transferidos y puntos peligrosos especiales	97
7.8. Corrección o refinado del diseño indicado en los puntos 7.6, 7.7, y 7.8	97
7.9. Construcción del sistema de tierras	98
7.10. Medición de campo del sistema de tierras	98
7.11. Revisión de acuerdo a las medidas de los puntos 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8	99

7.12. Modificación del sistema de tierras mediante el agregado de cables y / o varillas según el resultado obtenido en el punto 7.12	99
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
8.1. Conclusiones	102
BIBLIOGRAFIA	103
LISTADO DE TABLAS	104
LISTADO DE FIGURAS	105
AUTOBIOGRAFÍA	107

SÍNTESIS

En esta obra es mi deseo expresar mi interés en el estudio de algunas de las situaciones anormales que suceden en las subestaciones eléctricas, en particular la forma en que podemos proteger nuestra subestación contra sobre voltajes, seleccione como modelo la planta o subestación de la empresa HYLISA, con la finalidad de hacer un estudio comparativo entre el sistema de protección actual y el modelo que pretendo implementar, lamentablemente por motivos fuera de mi control no se pudo establecer una buena coordinación con la empresa, pero aun así el estudio se realizo.

La manera en que pienso desarrollar esto es, primero dando una breve explicación de los tipos de sobre tensiones que puedan aparecer en una subestación, haciendo mención a algunas de las teorías de la forma en que se crea o genera y se propaga el rayo en el caso de las perturbaciones externas, así como de las situaciones internas propias del sistema eléctrico que producen el mismo efecto (sobre tensión),

Enumerar los elementos o componentes que forman un sistema de protección contra sobre tensión, indicando sus principios de funcionamiento, selección y la ubicación estratégica en el circuito eléctrico para la protección de equipo en áreas o secciones específicas del sistema.

Para poder empezar el proceso de diseño de la red de tierras, es necesario tener la información necesaria acerca de las normas y reglamentos que rigen a las instalaciones eléctricas de esta naturaleza, los materiales utilizados en la actualidad y la aplicación de los estándares que se permiten en nuestro país, para posteriormente pensar en la selección del método a utilizar para él calculo de la red.

Obtener información acerca de la subestación (problema), haciendo visitas periódicas, poder hacer un juicio acerca de los elementos que la componen el equipo, protecciones, etc., aprovechar estas visitas también para efectuar el levantamiento de datos necesarios para hacer él calculo y posteriormente poder comparar esta información con los resultados obtenidos del diseño resultante, como propuesta hacia una mejoría de lo que ya existe.

Con los datos obtenidos empiezo a desarrollar los pasos del método seleccionado con anterioridad, para poder dar una solución parcial o final del arreglo de la red de tierras, para ello comparamos los resultados con los índices de referencia permitidos y de no ser así, será necesario hacer algunos ajustes o correcciones agregando más conductores de malla y electrodos o varillas de tierra para quedar dentro del rango.

Obtenido el diseño y con los datos arrojados empezamos a darnos una idea a que conclusiones podemos llegar.

1 INTRODUCCIÓN

1.1. - Descripción del problema.

Las subestaciones son parte fundamental en los sistemas de distribución eléctrica, cuyas especificaciones de diseño y operación están marcadas por las características eléctricas que presentan la diversidad de carga que es conectada a ella, esto es, la potencia, los niveles de voltaje y corriente que se van a manejar, por lo tanto cuando ocurre una variación en los niveles de voltaje (sobretensión) que excedan al de operación, las instalaciones son sometidas a trastornos que pueden interrumpir el suministro total o parcial de energía, además de poner en riesgo al personal que en ella labora.

Las sobre tensiones son originadas por diferentes causas, las cuales comúnmente suceden durante la operación de la subestación como resultado de esta situación es necesario disponer de un medio o sistema de protección confiable para evitar daños que se pudiera presentar. La mayoría de las sobretensiones son transitorios y de corta duración. (microsegundos)

Las causas de las sobretensiones son variadas, mientras unas pueden ser externas, como lo son las causadas por los rayos o descargas atmosféricas, las internas son causadas por varias razones, una, la que corresponden a la apertura y cierre de interruptores de potencia, otra a la

unión accidental con líneas de mayor tensión y finalmente con la generación de armónicas.

1.2. - Objetivo.

Efectuar el estudio y los cálculos necesarios para el rediseño del sistema de protección de la subestación de 400KV de la planta de HYLSA, ubicada en antiguo camino a San Nicolás y Vía Matamoros, Monterrey Nuevo León.

1.3. - Hipótesis.

La correcta aplicación del método para el cálculo del sistema de protección nos permite asegurar el adecuado y continuo funcionamiento de la subestación, costo y cantidad de materiales indispensables, y el cumplimiento con las normas necesarias para la protección del personal, comparadas con el sistema de protección existente.

1.4. - Límites del problema.

El diseño contempla la adquisición de información necesaria para el cálculo, para la selección de pararrayos, apartarrayos, y el arreglo de la red o sistema de tierras del edificio.

1.5. - Justificación.

Debido a que el sistema de protección existente no cumple plenamente con la función de proteger contra sobretensiones la subestación de la planta de HYLSA, con este trabajo, propongo su rediseño.

1.6. - Metodología.

Parte de la información será obtenida de manera personal mediante las entrevistas que tendré con el gerente de operaciones de la mencionada subestación.

Periódicamente haré visitas para comprobar el comportamiento del equipo de protección que actualmente tiene la subestación, e iré tomando las lecturas de los parámetros involucrados o necesarios para el diseño.

Seleccionare el equipo de medición utilizado para la lectura de los parámetros necesarios para el cálculo, como los son: resistividad eléctrica del terreno, potencia, y nivel de voltaje de los equipos de la subestación.

El análisis se establecerá mediante el uso de un método tradicional de cálculo matemático, sobre la base de las recomendaciones practicas que marcan los institutos de la IEEE como la ANSI. Asiendo referencia a los estándares 141-1986, 141-1982, 81-1983 y 80-1986.

Indicare la distribución y localización final del equipo sobre el área de la subestación, como resultado de los datos proporcionados por el presente diseño o estudio.

1.7. - Revisión bibliográfica.

El trabajo básicamente tomó como referencia la norma oficial mexicana, NOM-001-SEMIP-1999 obtenida de un escrito donde aparece

una replica del mismo, así como el cálculo de la red de tierras estuvo sustentada sobre las recomendaciones y la guía del IEEE (Instituto De Ingenieros en Electricidad y Electrónica, la cual establece los pasos y criterios para el diseño de una red de tierra para protección por sobre voltaje, la utilización del libro Alta Tensión y Sistemas de Transmisión para los temas correspondientes a las sobre tensiones de tipo externas (rayos) como internas y los aparatos de protección relacionados a éste como lo son, pararrayos, apartarrayos e interruptores, la valiosísima ayuda de los apuntes o memorias sobre Sistemas de Tierras para Subestaciones Eléctricas de Potencia del Ing. Enrique López Guerrero, catedrático de la Fac. de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, la aportación del libro de Donald Beeman, Industrial Power System Handbook para el tema del estudio del corto circuito, las consideraciones practicas en la aplicación de formulas a los temas de los Potenciales de Paso y de Contacto tolerables para que el cuerpo humano no sufra de algún daño que nos proporciona el libro El ABC de las Instalaciones Eléctricas Industriales del Ing. Gilberto Enríquez Harper.

2 ANTECEDENTES

2.1. - Origen de las sobre tensiones.

Las sobretensiones básicamente pueden ser de dos tipos:

Sobretensiones de origen externo. (o atmosférico)

Sobretensiones de tipo interno.

2.2. - sobre tensiones de origen atmosférico.

La mayoría de los sobre voltajes que se originan por causas externas en una subestación se deben a los rayos, existen otras causas menos comunes como la unión de líneas de mayor voltaje (transmisión) con líneas de menor magnitud (distribución), como lo son las suministradas por las subestaciones, y por ultimo el llamado pulso electromagnético que es resultado consecuente al ocurrir una onda nuclear expansiva.

El origen del rayo se ve respaldado por varias teorías que se exponen más adelante, la mayoría de los postulados coinciden en que la nube de tormenta tiene una constitución bipolar en la que la carga negativa se distribuye en forma predominante en la parte inferior de la nube como lo muestra la figura 2.1. Numerosos experimentos en la actualidad han verificado dicha distribución.

Los sobrevoltajes originados dentro de la subestación se deben a cambios en la configuración o arreglo del circuito, fallas de la línea o por eventos internos que afectan la frecuencia fundamental cuando entran en repetidas ocasiones bancos de capacitores automáticos.

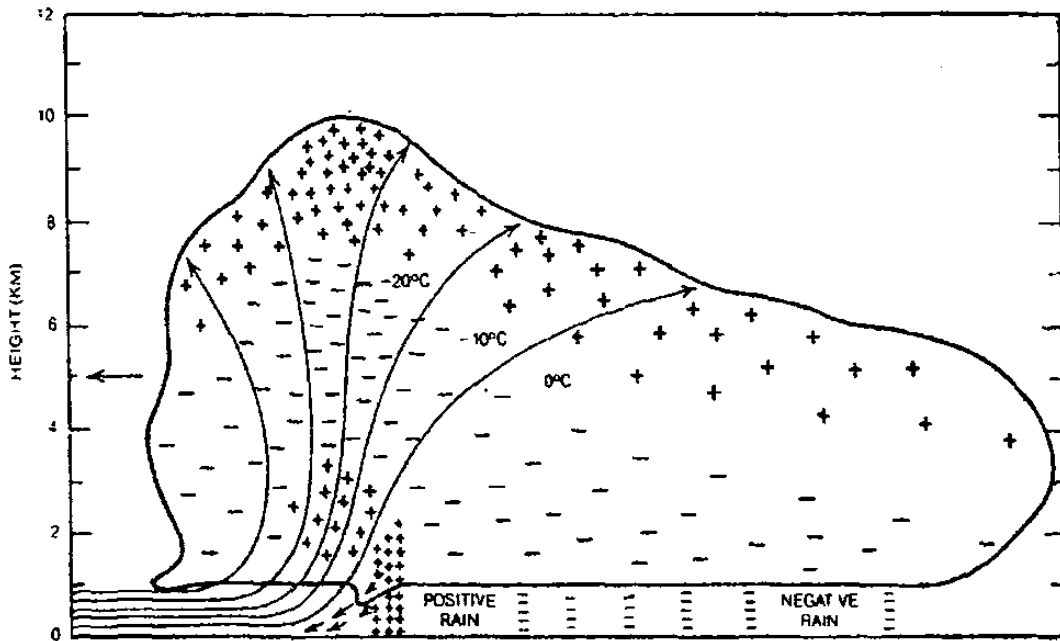


Fig. 2.1

En esta figura se muestra la distribución de cargas en la nube según Simpson, la cual ha podido ser constatada en la práctica con la ayuda de globos sonda, podemos apreciar en la parte inferior una temperatura promedio de +4 °C, estos gradientes térmicos desempeñan un papel muy importante al formarse la descarga ya que esto favorece su orientación hacia la tierra.

Esta teoría puede ser simulada en laboratorios en donde gotas de 5mm de diámetro son desintegradas cuando el viento alcanza velocidades superiores a 8 m/seg. y se obtiene entonces una distribución de cargas parecidas a la establecida por Simpson.

Teoría de Simpson

Esta teoría se apoya en los experimentos de laboratorio, en donde se desintegran gotas de lluvia por la acción de una fuente o corriente de aire, las partículas así formadas denotan una carga positiva y el aire a su vez, acusa la presencia de una gran cantidad de cargas negativas de muy poca masa y por consiguiente de gran movilidad.

En condiciones naturales esto ocurre cuando una corriente de aire alcanza la velocidad suficiente para desintegrar las gotas de lluvia, la corriente de aire transporta entonces a los iones negativos hacia arriba de la nube donde se combinan con las partículas de agua. Las gotas de lluvia que han sufrido un fraccionamiento también son llevadas hacia arriba por la acción del viento, uniéndose entre ellas para formar así gotas grandes y caer de nuevo.

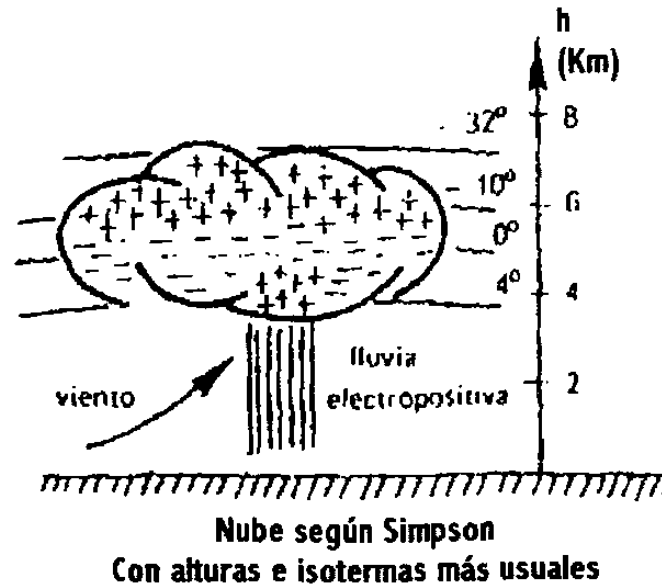


Fig. 2.2

Teoría de Schonland.

En esta teoría se resumen el ciclo de la nube de la tormenta y la descarga eléctrica originada en la misma.

- a) Las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo por consiguiente, concentraciones desiguales de la carga en el seno de la misma. Mientras tanto el gradiente eléctrico de la tierra permanece casi invariable, contrariamente la nube eleva su gradiente eléctrico a un valor crítico de 5 KV/cm. de allí que la descarga provenga siempre de la nube y no de la tierra.
- b) Caracterizándolo con una apreciable intensidad de corriente de hasta 200KA. Cuando el gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico comienza a ocurrir pequeñas descargas en el seno de la nube, estas en

virtud de la ionización por choque donde una partícula de masa “m” que se desplace a una velocidad “v”, por medio de un choque inelástico, suministrándole a un átomo o molécula toda su energía de ionización “Aj”: ocurre ionización por choque, de donde se origina:

$$\frac{mv^2}{2} > Aj .$$

Es por este efecto que las descargas van degenerando en

una especie de avalancha denominada descarga piloto la cual avanza a una velocidad promedio de 150 Km/seg.

- c) La rama de la descarga piloto orientada hacia la tierra logra imponerse en su crecimiento, viéndose acompañada entonces de pequeños puntos luminosos característicos de las descargas escalonadas, cuyo tiempo de duración es relativamente corto, recorriendo un trayecto aproximado de 50 mts. a una velocidad de 50,000 Km/seg. Estas descargas raras veces llegan a la tierra por la intermitencia de la descarga piloto de 30 a 90 microsegundos lo que sustrae la energía para que esto ocurra. El incremento del gradiente eléctrico al aproximarse la descarga a la tierra favoreciendo la formación de un canal de recepción.
- d) El canal de recepción sale al encuentro de la descarga piloto, la cual trae una gran cantidad de descargas negativas formándose así un canal plasmático.

Para neutralizar la carga en la nube cargas eléctricas positivas abandonan la tierra utilizando el canal previamente ionizado, la primera de las descargas se denomina descarga de retorno cuya velocidad de propagación es aproximadamente 30,000 Km/seg. principalmente requiere un tiempo de 20,000 microsegundos para lograr su cometido.

- e) Debido a la fuerza que provoca el impacto de las cargas eléctricas que la descarga de retorno introduce en el seno de la nube, en la mayoría de los casos se origina una segunda descarga orientada hacia la tierra, denominada descarga secundaria con una velocidad promedio de 3,000 Km/seg. y un tiempo de 100 microsegundos en llegar a la superficie de la tierra. Las descargas de retorno y secundaria pueden repetirse hasta siete combinaciones en forma sucesiva.

Esquema de una descarga atmosférica según Schonland

Nube de tormenta con cargas eléctricas NO homogéneas.

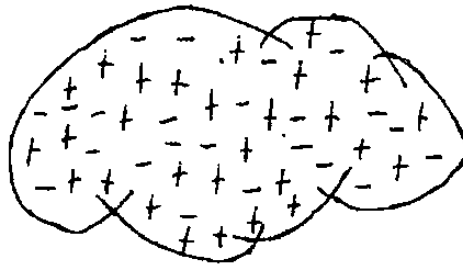


Fig. 2.3

Tormenta Según Schonland

Se empieza a formar el canal plasmático acompañado de descargas escalonadas (stepped leader).

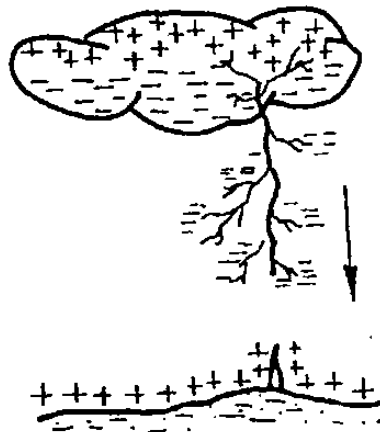


Fig. 2.4

Encuentro de cargas negativas y positivas y la formación total del canal plasmático.

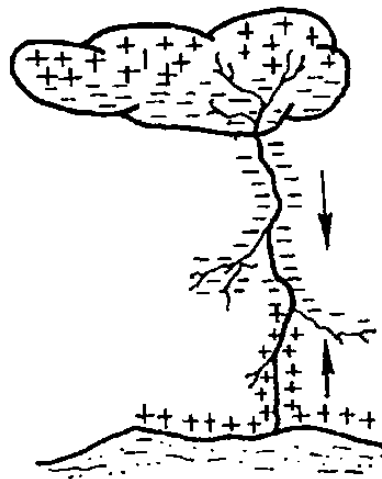


Fig. 2.5

2.3. - Disturbios en las líneas de distribución debido al cierre y apertura de interruptores.

Circuitos con operación de interrupciones constituyen cambios en los parámetros del circuito y pueden ser los responsables en la creación de sobretensiones generalmente de corta duración. Esto debe ser importante para tener un conocimiento más profundo del comportamiento normal de los interruptores de c. a. (corriente alterna)

La operación normal de conexión y desconexión de interruptores dentro de un sistema puede ser causa de sobre voltajes. Estos voltajes generalmente no son mayores a tres veces el voltaje nominal del circuito pero sí de corta duración. Equipos contra sobre corrientes como lo son los interruptores térmicos o los fusibles sin límite de corriente, en general, interrumpen el circuito a una corriente normal de valor cero, a la cual el tiempo de energía almacenada en la inductancia del circuito es cero. Los sobre voltajes así desarrollados son el resultado de la oscilación transitoria en el circuito inductivo-capacitivo, siendo almacenada energía en el circuito capacitivo al mismo tiempo que se interrumpe la corriente. Más serios sobre voltajes pueden ser producidos por equipos o aparatos los cuales interrumpen el circuito forzando la corriente a cero. Equipos tales como interruptores de vacío y fusibles limitadores de corriente deberán ser cuidadosamente instalados para este tipo de problemas de sobre voltaje.

2.4. - Contacto con líneas de mayor voltaje.

Si los conductores de un circuito eléctrico de mayor voltaje se pone en contacto con otros de un circuito de menor voltaje, el mismo potencial aparecerá sobre ambos circuitos en el punto de contacto. Si el circuito de menor voltaje no tiene el neutro aterrizado, su potencial deberá incrementarse al voltaje del sistema de mayor potencial o podrá ocurrir un chispazo. Si el sistema de menor voltaje esta firmemente anclado a tierra mediante un aterrizado físico del neutro, grandes valores de corriente pudiese fluir desde el sistema de mayor voltaje, pero un voltaje mucho menor deberá aparecer con el sistema de neutro aislado.

Un ejemplo muy común se presenta cuando accidentalmente se conectan los voltajes del primario y el secundario de un transformador en un sistema industrial los cuales una vez más son protegidos mediante el uso de un aislamiento o encapsulado metálico y de barreras metálicas los cuales separan los conductores del sistema con potenciales de operación diferentes. En algunos casos los circuitos que van por encima de las personas, en donde ambos circuitos primario y secundario se mezclan en la misma zona, pero separados substancialmente uno del otro para reducir el peligro de un contacto accidental al mínimo. Cruces ocasionalmente han ocurrido entre primario y secundario en circuitos aéreos, y en algunos casos se ha sabido de fallas ocurridas entre el primario y secundario dentro del transformador.

La figura muestra este tipo de conexión de falla. La cual puede ser responsable de los daños producidos por sobre voltaje a sistemas de bajo voltaje sin aterrizamiento. La más eficiente protección contra ese tipo de

sobre voltajes es al aterrizar el sistema de bajo voltaje mediante una impedancia hacia tierra haciendo que baje la posibilidad de aceptar la máxima corriente de falla de línea a tierra del sistema de alto voltaje sin desviar o mover el neutro del sistema de bajo voltaje a un valor de peligro.

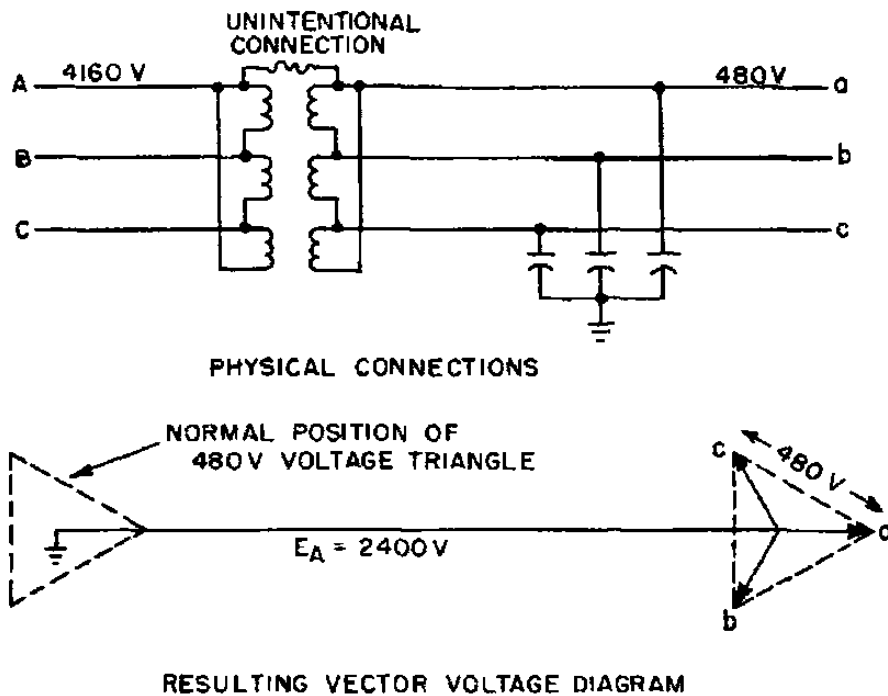


Fig. 2.6

Sobre voltaje en un sistema sin aterrizar de 480 volts como resultado del contacto entre las líneas de bajo y alto voltaje.

2.5. - Fallas a tierras.

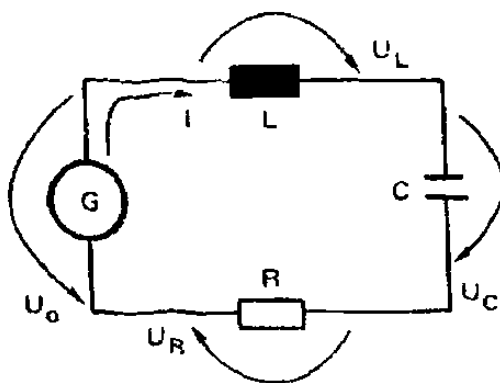
Una fuente muy común que produce un sustancial sobre voltaje en sistemas sin aterrizar es la falla de una fase o tres fases a tierra. En este caso el aislamiento de las otras fases es sujeto a sobre voltajes de un 73% por arriba de lo normal. Un sistema con un neutro solidamente aterrizado no

deberá permitir estos sobre voltajes. Mientras que estos voltajes rara vez se aproximan a los niveles de aislamiento del equipo y de los circuitos, el efecto acumulativo de esta elevación comparados con los esfuerzos del voltaje normal puede reducir de alguna forma la vida de los aislamientos.

2.6. - Efecto de resonancia.

Un circuito oscilatorio, compuesto de una inductancia L , una capacitancia C y una resistencia óhmica R mostrado en la figura 2.7, denotará un comportamiento resultante capacitivo o inductivo de acuerdo con los valores determinados por la frecuencia motriz, $\frac{1}{\omega C}$ u ωL . Aquí hay que ser prudente para poder diferenciar los casos que se presentan:

- Circuito sin pérdidas ($R=0$)
- Circuito con pérdidas ($R \neq 0$)
- Circuito en resonancia



Circuito resistivo, inductivo y capacitivo.

Fig. 2.7

El circuito en cuestión entrara en resonancia una vez que se cumpla la siguiente condición: $\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Las caídas de tensión en la inductancia y capacitancia acusan entonces valores máximos, pero iguales entre sí. Analíticamente se obtiene el siguiente comportamiento.

$$U_{C,\max} = U_{L,\max} = \frac{I_{\max}}{\omega C} = \frac{U_0 \omega_r L}{R} = U_0 \frac{Z}{R}$$

ya que, como se indico, $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Se puede observar que el incremento en la tensión en los elementos L y C, en caso de resonancia, está determinado por la relación existente entre la impedancia característica del sistema (Z) y la resistencia de amortiguación. (R). Esta última, por encontrarse en el denominador, desempeña un papel limitante en la tensión.

En la practica la frecuencia motriz no tiene que ser necesariamente la frecuencia fundamental del sistema. Esta podría ser, por ejemplo, un armónico de la misma. Afortunadamente la amortiguación existente en los sistemas comerciales es, por lo general, bastante grande como para amortiguar y atenuar estos fenómenos oscilatorios. Pero aun cuando se cumpla $\omega < \omega_r$ y, las tensiones parciales exceden el valor de la tensión de operación, en especial para el caso, cuando el aislamiento de los elementos capacitivos se ve solicitado por severos valores de la tensión.

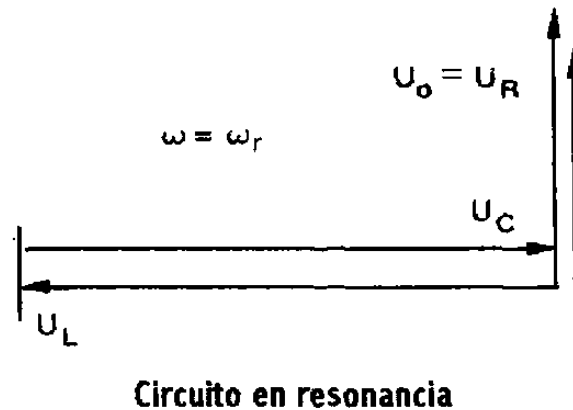


Fig. 2.8

2.7. - Fallas intermitentes.

Dentro del campo experimental y de los estudios teóricos tenemos el arqueo, o fallas a tierra intermitente en sistemas sin aterrizar bajo ciertas condiciones, producen voltajes tan altos como el de seis veces el voltaje normal o nominal. Las condiciones necesarias para producir sobre voltajes requiere que el esfuerzo eléctrico de la trayectoria del arco se presente en un alto grado después de cada extinción del arco que haya aparecido después de la precedente ignición.

Substanciales sobre voltajes pueden ser desarrollados en sistemas industriales de corriente alterna sin aterrizado mediante el chisporroteo o por conexiones intermitentes de falla a tierra. El carácter intermitente de la trayectoria del corto circuito puede ser el resultado de variaciones causadas

por un conductor eléctrico que hace contacto intermitentemente con tierra, el resultado de unas cuantas partículas del conductor derretido el cual establece intermitentemente una trayectoria de conducción hacia tierra, o como resultado de sucesivos cortes y cierres fuera del espacio que separa al conductor de tierra. En él ultimo de los casos el que envuelve una separación corregida entre el conductor y tierra, un progresivo incremento interrumpiria el voltaje a través del claro o rendija el cual es un esencial elemento en la creación de muchos sobre voltajes.

Condiciones intermitentes de fallas a tierra sobre sistemas de bajo voltaje sin neutro aterrizado han sido observadas ya que estos crean sobre voltajes de 5 a 6 veces del valor normal o nominal.

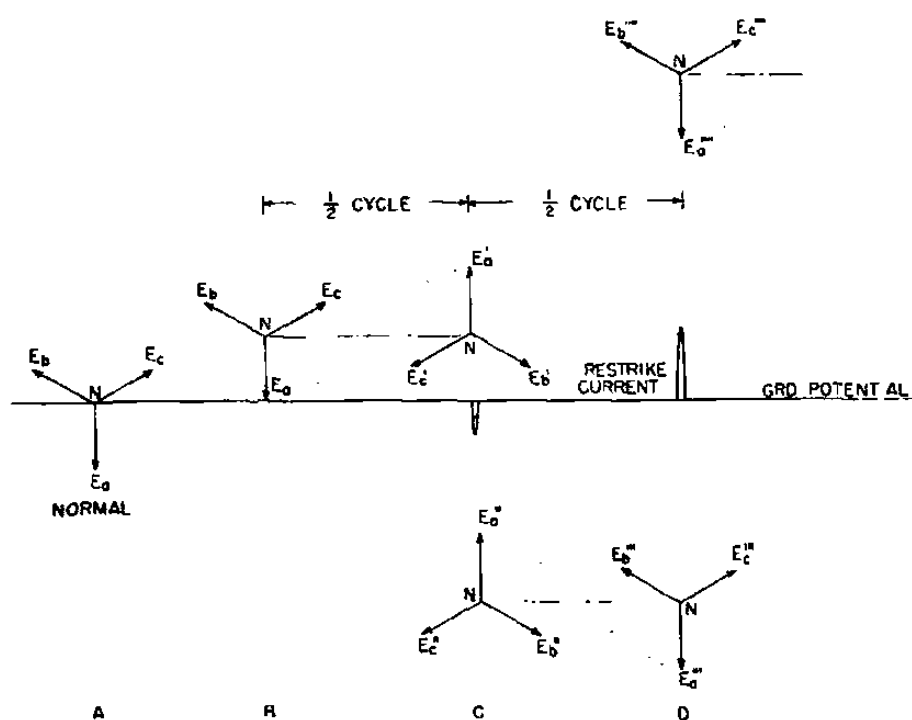


Fig. 2.9

Sobre voltaje en un sistema sin aterrizar debido al repetitivo contacto momentáneo entre la línea y tierra.

3 ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE PROTECCIÓN SOBRETENSION

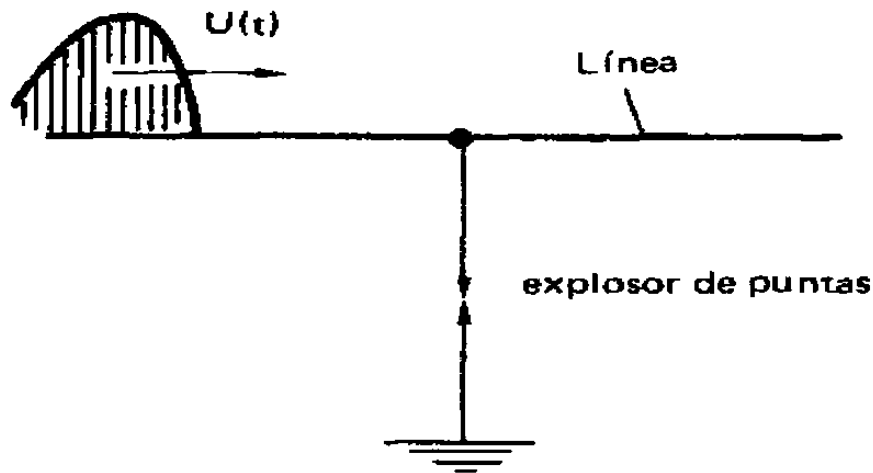
INTRODUCCIÓN

Los pararrayos representan hoy en día el dispositivo más utilizado para combatir las sobretensiones; comenzándose a utilizar en los sistemas comerciales de transmisión de energía para enviar a tierra las sobretensiones atmosféricas. Posteriormente, con el surgimiento de tensiones de operación cada vez más elevadas, se le comenzó a emplear para mandar a tierra también a las sobretensiones internas, de allí que el nombre de descargador de sobretensiones sea más adecuado.

Así pues, el primer dispositivo utilizado para enviar a tierra las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión y posteriormente en subestaciones fue un simple explosor de puntas (rod gap), el cual se ilustra en la figura 3.1.

3.1. - Pararrayos.

Una instalación cuya función sea la de proteger contra uno de los fenómenos atmosféricos como lo es el rayo, tiene como principal objetivo el de asegurar las estructuras y / o a las personas que laboran en una subestación, reduciendo en forma significativa el riesgo de daño que este pudiera causar.



Representación de un explosor de puntas.

Fig. 3.1

La decisión de dotar a una estructura de un sistema de protección contra el rayo, depende de la probabilidad del impacto de un rayo en la estructura de la subestación y la de asumir las consecuencias que emanen de este fenómeno.

Como fenómeno eléctrico, el rayo puede presentar las mismas consecuencias que cualquier otra corriente que circule por un conductor eléctrico, y los efectos causados por este deberán ser considerados de gran importancia, sobre todo los que a continuación indicamos:

- Efectos ópticos.
- Efectos acústicos.
- Efectos electroquímicos.
- Efectos térmicos.
- Efectos electrodinámicos.
- Radiaciones electromagnéticas.

Al dimensionar las diferentes partes que componen el sistema de protección contra los rayos, se deben considerar los efectos térmicos y electrodinámicos en forma especial, ya que tienen una notable influencia en el medio de descarga a tierra, en la siguiente figura se muestra un sistema de protección contra el rayo con todos sus elementos unidos entre sí.

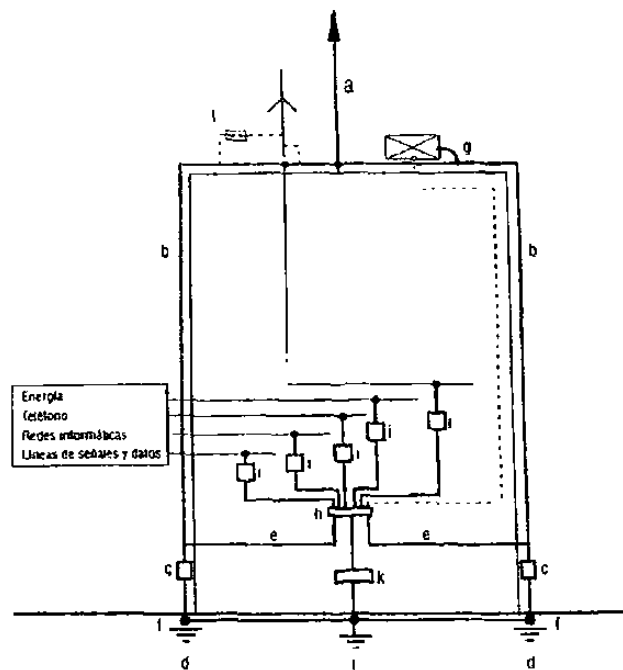
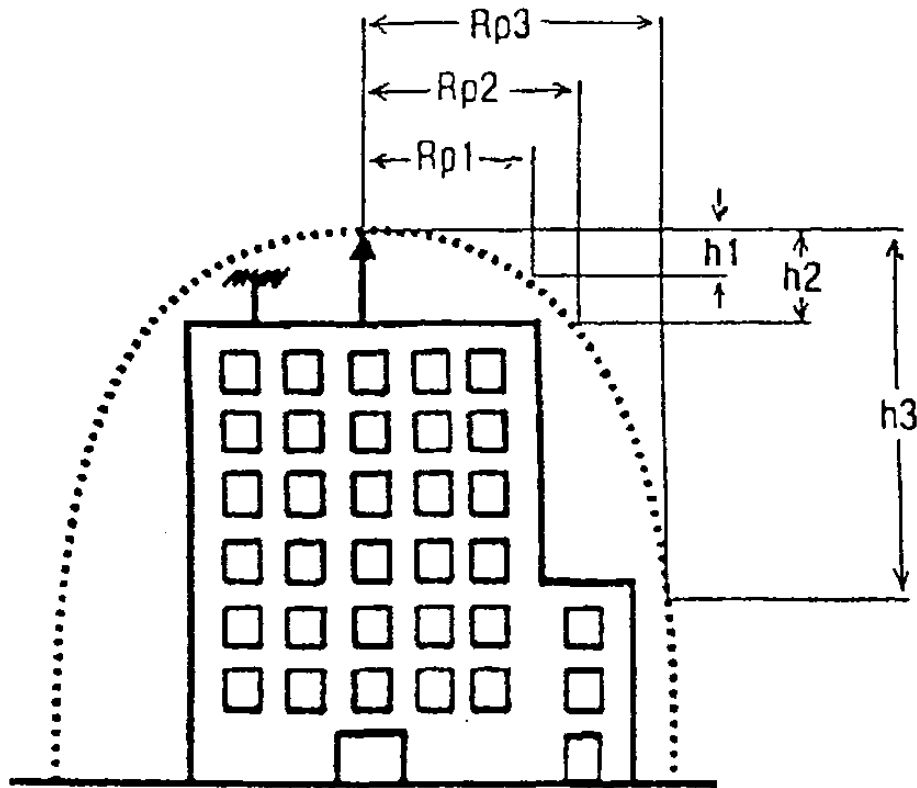


Fig.3.2

Un pararrayos con dispositivo de cebado (PDC) está compuesto por una o más puntas captadoras con un eje sobre el cual se soporta el sistema de conexión para el conductor de bajada.

Par la determinación de la zona protegida por el PDC se utiliza el modelo electromagnético de tal forma que se instalara de preferencia en la parte más alta de la estructura que lo soporta.



Radlos de Protección

Fig.3.3

R_p (m): Radio de protección al nivel del plano horizontal considerado.

h (m): Diferencia de altura entre la punta del pararrayos y el plano horizontal considerado.

3.2. - Apartarrayos.

El apartarrayos es un dispositivo de protección que limita sobretensiones transitorias mediante las descargas de la onda de sobretensión, luego de lo cual impide que continúe el flujo de la corriente, permaneciendo habilitado para repetir su función.

En su forma más elemental consiste de un par de puntas o electrodos con una cierta separación donde se establece el arco eléctrico, el cual presenta las siguientes desventajas:

- a) La tensión de disparo depende en alto grado de la polaridad.
- b) Retraso de funcionamiento, dado por el tiempo de formación de cresta de la onda incidente. Para funcionar en $1\mu\text{s}$ la tensión de disparo debe ser 1.5 a 3 veces superior a la tensión 50 % de choque disruptiva.
- c) El arco no se extingue por sí mismo, debido a la naturaleza capacitiva del dispositivo.

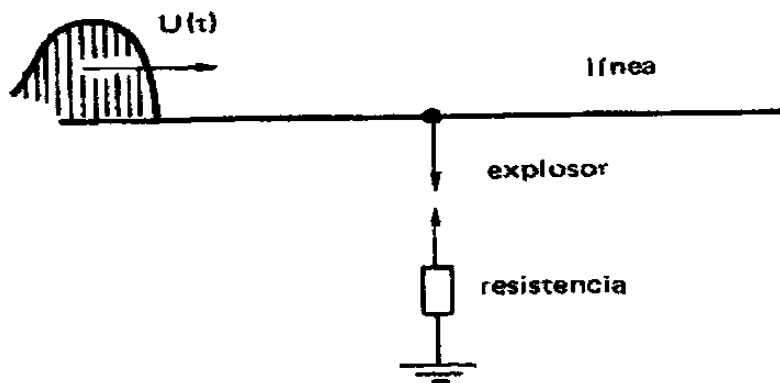
El disparo del explosor implica, además, un corto circuito en el sistema, el cual se ve de inmediato alimentado por la intensidad de corriente de régimen.

Las ventajas fundamentales de este dispositivo son: bajo costo de adquisición y bajo valor de tensión residual. No obstante, cabe señalar que sé esta enfocando la evolución histórica de los descargadores de sobre tensiones. A principios de siglo no se conocían otros dispositivos. Las ventajas del explosor de puntas no son determinantes, pues no existía otra alternativa; por el contrario, sus desventajas motivaron el estudio para el desarrollo y optimización de los explosores.

Otro dispositivo es el descargador de explosor sencillo, el cual ya ha sido representado en la figura 3.1, denotando un comportamiento capacitivo. Cuando dispara, la intensidad de corriente de derivación se encuentra desfasada 90° respecto a la tensión, dándose las condiciones

ideales para un reencendido del arco. La corriente, además, no se ve limitada en su derivación a tierra, y la corriente de régimen sigue el mismo camino.

Esto motivo que el explosor se viera rápidamente provisto de una resistencia óhmica en su extremo conectado a tierra, según se ilustra en la siguiente figura.



Representación esquemática de un explosor de puntas provisto de una resistencia. Fig. 3.4

Lo que se obtenía con esta resistencia:

1. Conferir al dispositivo de protección un comportamiento RC resistivo-capacitivo de manera que el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje sea menor a los 90° . De esta manera se trataba de combatir el reencendido del arco.
2. La resistencia también limita la corriente que se deriva a tierra.

El dispositivo, por consiguiente, demostró rápidamente un mejor comportamiento, aunque no del todo satisfactorio. Así, muy pronto se advirtió que la resistencia no debería ser lineal, sino denotar un comportamiento autoválvula; es decir, que su valor óhmico cambiase con el valor de la tensión imperante entre el conductor y el dispositivo de protección.

Los explosores fueron desplazados paulatinamente de los sistemas de transmisión de energía como protectores primarios. Hoy en día su sitio lo ocupan los pararrayos autoválvula

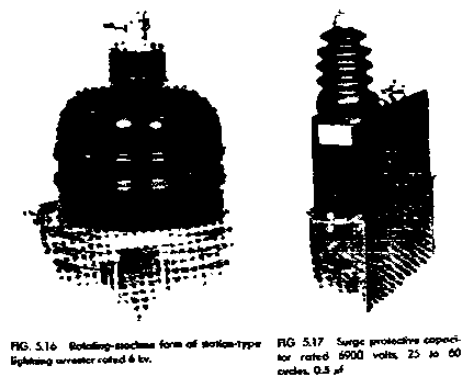
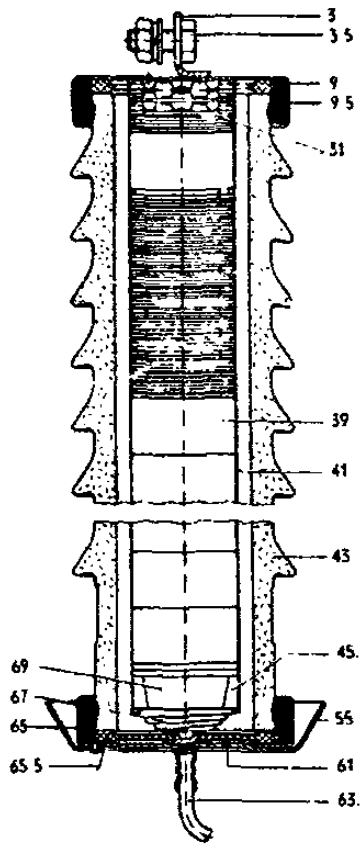


Fig. 3.5

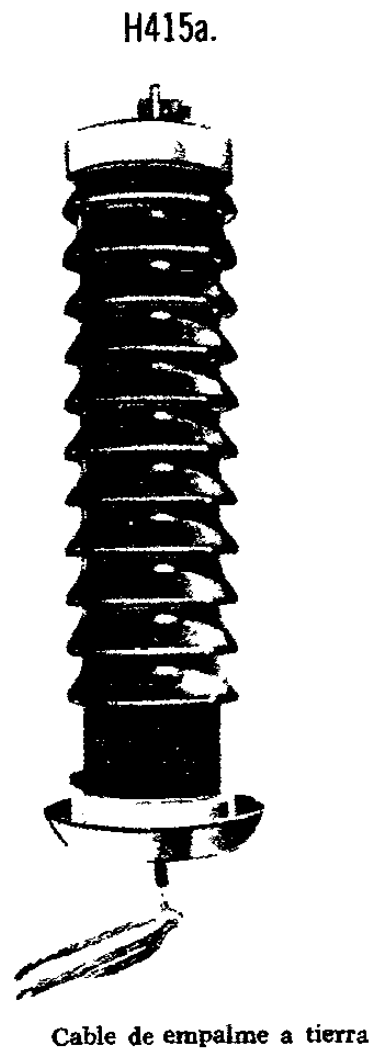
Apartarrayos tipo autoválvula para bajo voltaje.

3.3. - Sistemas de tierras.

Definición.- Un sistema de tierras es un grupo de conductores en el cual cualquier punto de este se encuentra aterrizado, solidamente o a través de un aparato limitador de corriente.



- 3. Pieza de empalme
- 3.5 Tornillo de empalme
- 9. Cubierta superior
- 9.5 Junta
- 31. Explosor de extinción
- 39. Discos de resistencia
- 41. Tubo aislante
- 43. Envolvente de porcelana
- 45. Relleno de nitrógeno
- 55. Platillo inversor
- 61. Fusible de sobrecarga
- 63. Empalme a tierra
- 65. Cubierta inferior
- 65.5 Junta
- 67. Resorte
- 69. Cuerpo de relleno y contacto



Apartarrayos Autoválvula

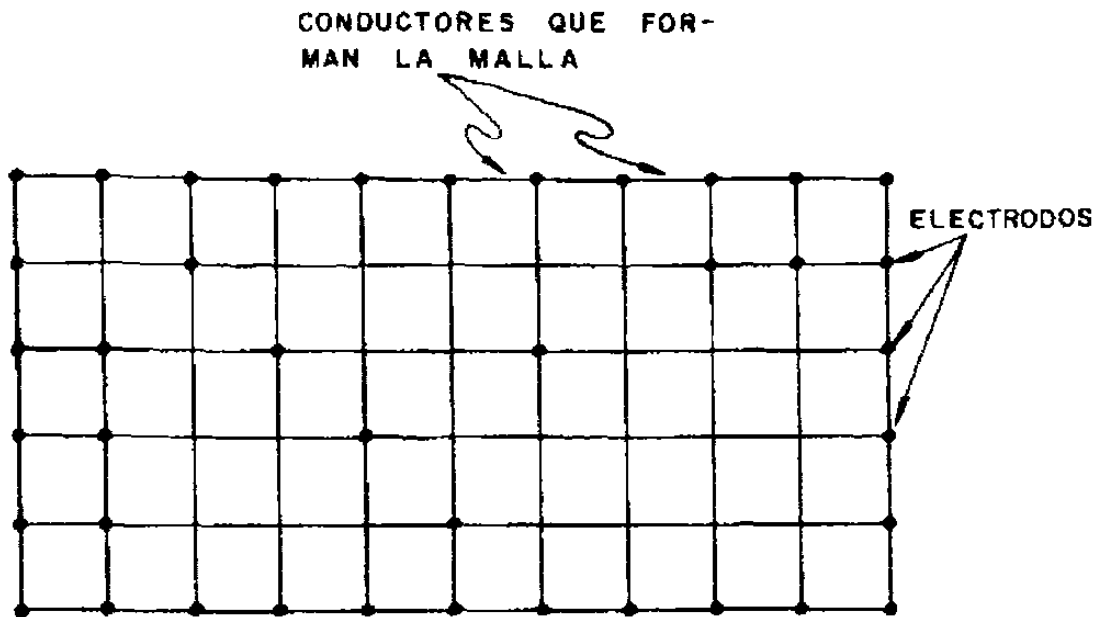
Fig. 3.6

El objetivo de un sistema de tierras en una instalación eléctrica, es el de proporcionar una superficie debajo del suelo y alrededor de la instalación, que mantenga un potencial uniforme y muy cercano a cero con la finalidad de:

- Proteger a los operadores y a toda aquella persona que se encuentre dentro de las instalaciones.
- Evitar que las partes de los equipos así como cualquier parte de la estructura del edificio adquieran potenciales de riesgo, como también la de establecer una trayectoria sólida a tierra para la protección de fallas a tierra.

El concepto de un buen sistema de tierras, es el de obtener una resistencia a tierra tan baja como sea posible. Sin embargo, en sistemas donde las corrientes de falla son excesivamente altas, puede ser imposible, mantener potenciales a tierra dentro de los límites de seguridad, aunque la resistencia a tierra se mantenga baja.

En la actualidad los sistemas de tierras, especialmente en las subestaciones eléctricas, adoptan la forma de una malla que contiene un número determinado de pequeñas mallas rectangulares o cuadradas, de conductores de tierra colocados en forma horizontal, y conductores a electrodos (varillas enterradas), localizadas a ciertos intervalos.



MALLA DE TIERRA

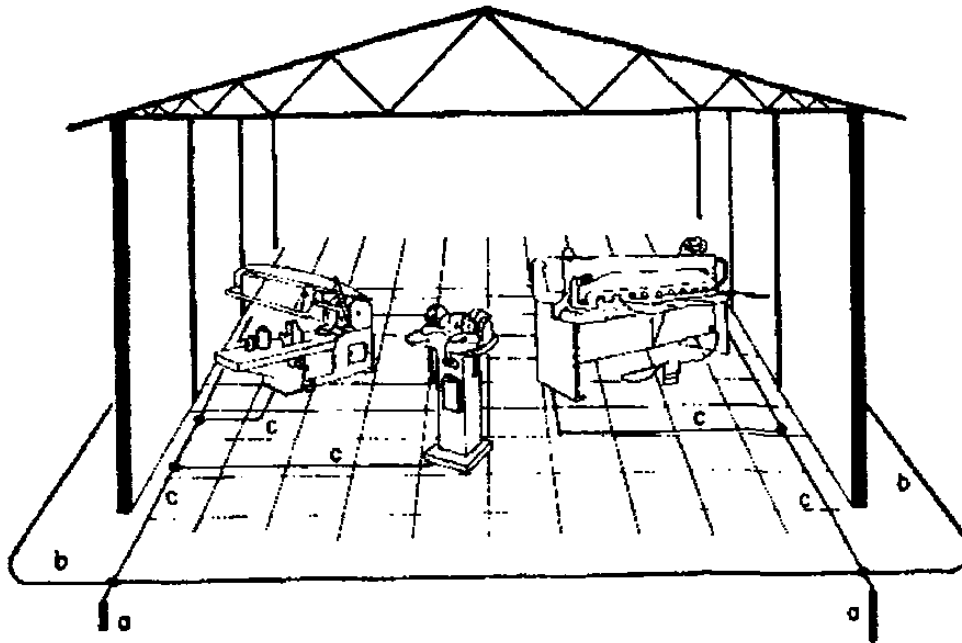
Fig. 3.7

Los electrodos de tierra pueden ser utilizados o no, dependiendo del diseño de la malla. Todas las estructuras y carcazas de equipo, incluyendo las rejillas metálicas en el área de trabajo, se deben conectar por seguridad, a la malla de tierra.

3.4. - Interruptores y relevadores.

Un disyuntor o interruptor de potencia es un dispositivo cuya función consiste en interrumpir y restablecer la conducción de corriente en un circuito. Es decir, el interruptor abre o cierra galvánicamente al circuito en

cuestión. Esta interrupción puede efectuarse bajo carga, para despejar por



ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA INTALACION DE PUESTA A TIERRA

- a.- DISPERSORES (ELECTRODOS DE VARILLA)
- b.- CONEXION ELECTRICA ENTRE DISPERSORES
- c.- CONDUCTOR A TIERRA

Fig. 3.8

ejemplo una falla, o para desconectar o conectar cualquier equipo eléctrico o línea de transmisión.

El margen de aplicación de los interruptores de potencia es hoy en día más amplio, debido fundamentalmente a las elevadas tensiones de transmisión de energía en el ámbito comercial, las cuales llegan a 800KV, mientras que a nivel experimental las tensiones respectivas sobrepasan loa

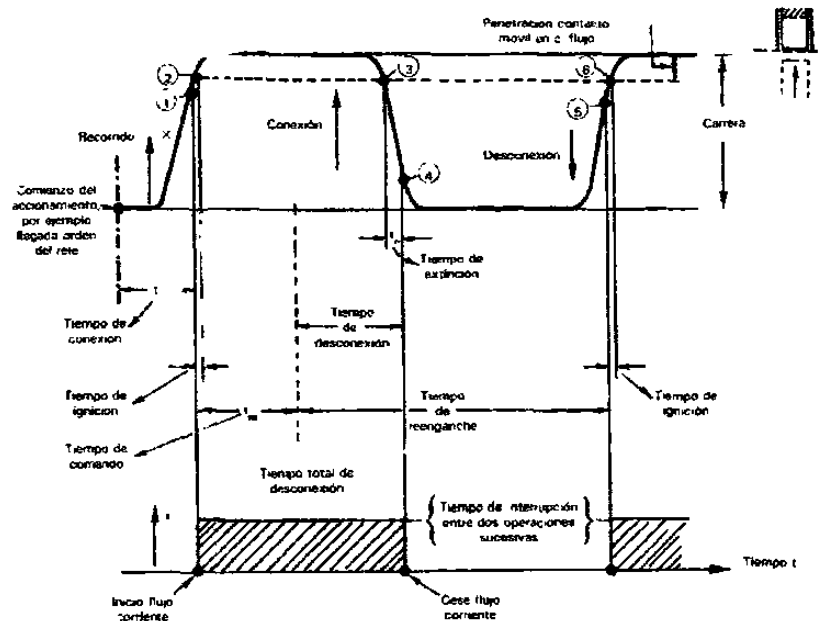
1000KV. Las intensidades de corto circuito de los sistemas densamente mallados han sobrepasado los 50,000 A, debido a las elevadas densidades de la carga de las ciudades modernas y centros industriales de gran capacidad de producción.

Antes de describir los diferentes tipos de interruptores, y considerando que se está ante un dispositivo de maniobra relativamente complicado, es prudente definir los conceptos básicos que facilitaran su entendimiento.

- Tensión nominal.- Es la tensión que el interruptor presenta en condiciones normales de operación. En muchos casos esta tensión se encuentra ligeramente por debajo de la tensión de diseño.
- Tensión de diseño.- Se debe entender como la tensión nominal máxima de operación para la cual el fabricante garantiza su equipo en condiciones de régimen permanente.
- Potencia de ruptura.- Durante un fallo tanto la intensidad de corriente como la tensión asumen cuando menos dos valores diferentes. Así, por ejemplo, la corriente de corto circuito denota un valor inicial (valor instantáneo de la corriente de falla) y uno permanente (corriente de ruptura). La potencia de ruptura es entonces la intensidad de corriente de ruptura que un interruptor puede despejar satisfactoriamente, a la tensión prevaleciente en el sistema.
- Tensión de recuperación.- Es la tensión que debe existir en los contactos del interruptor para que no aparezca un reencendido del arco dentro de la cámara de interrupción del interruptor. Al igual que la corriente, hay aquí también dos valores diferentes: tensión de recuperación transitoria (transient recovery voltaje), que se debe

- entender como la tensión que aparece en los contactos del interruptor en el primer intervalo, es decir, cuando el proceso transitorio de la maniobra esta en pleno apogeo; esta se ve seguida en el tiempo por la tensión de recuperación de régimen permanente, la cual se establece en los contactos del interruptor solo a frecuencia nominal.
- **Reignición y reencendido.-** Al reencendido del arco que ocurre entre los contactos del interruptor durante el primer cuarto ($1/4$) de ciclo denominándolo reignición, del reencendido que puede presentarse mas tarde (después de $1/4$ de ciclo), al cual llaman reencendido simplemente. La reignición por lo general no da origen a sobretensiones peligrosas, mientras que el reencendido puede conllevar a factores de sobretensión comprendidos en el orden de 3 a 4 pu.
 - **Capacidad de cierre.-** La capacidad de cierre o conexión de un interruptor, al circular la intensidad de corriente de falla, indica el valor máximo de dicha corriente que el interruptor puede conectar satisfactoriamente a una tensión dada. Esta podría ser la misma tensión nominal.
 - **Ciclo de trabajo.-** El ciclo de trabajo de un interruptor consiste en una serie de operaciones de apertura (desconexión) y cierre (conexión), o ambas a la vez. En la siguiente figura se expone la maniobra que realiza un interruptor de potencia en una de sus fases, al conectar y desconectar un circuito determinado. Los tiempos asociados a las maniobras son de suma importancia, tanto desde el punto de vista de la estabilidad del sistema, como desde el de la demanda térmica. Mientras más tarde el interruptor en despejar la corriente de falla, mayor será el daño que la misma causará al sistema.

Introducción



Proceso de conexión y desconexión de un interruptor.

Fig. 3.9

El comportamiento de los interruptores en el sistema es de suma importancia pues la corriente de falla puede ser de naturaleza capacitiva o inductiva.

La desconexión de capacitancias o condensadores puede conllevar fácilmente a reencendidos del arco en el interruptor de potencia. Casos de importancia práctica son la desconexión de líneas largas, marchando en vacío, y la desconexión de bancos de condensadores.

Enseguida se describe brevemente los diferentes tipos de interruptores o disyuntores de potencia que se emplean en las tensiones de subtransmisión (13.8 KV) como en las de transmisión. (hasta 800kV)Se

resaltan los medios de extinción que usan los diferentes tipos, así como las características constructivas más relevantes.

- **Soplado magnético.-** Se puede considerar como el resultado de los esfuerzos por eliminar sustancias líquidas en las cámaras de los disyuntores de tensiones intermedias. Su funcionamiento básico consiste en:
 - a) Prolongar el arco eléctrico con la ayuda del soplado magnético engendrado por el propio campo.
 - b) Dividir el arco eléctrico en secciones múltiples, de manera que la tensión en cada una de ellas no exceda a las tensiones comprendidas entre 110 y 130 V.
- **Gran volumen de aceite.-** Fueron los primeros que se emplearon para interrumpir elevadas intensidades de corriente a tensiones igualmente elevadas. Constructivamente constan de un recipiente de acero lleno de aceite en el cual se encuentran emplazados dos contactos en serie. El aceite sirve al mismo tiempo como medio aislante y medio de extinción de todo el dispositivo.
- **Pequeño volumen de aceite.-** En realidad se necesita una relativamente pequeña cantidad de aceite para la extinción del arco. Esto motivo el desarrollo de interruptores de potencia con un reducido volumen del mismo. El aislamiento de los polos entre sí y contra tierra se logra entonces con la ayuda de otros materiales aislantes. (por ejemplo, porcelana, resina sintética, esteatita, etc.) Se diferencian por su concepción básica en dos tipos:
 - a) Interruptor con flujo de extinción.
 - b) Interruptor según el principio de expansión.

- Aire comprimido.- El desarrollo del interruptor de aire comprimido comenzó en 1929 cuando se introdujo la válvula de Ruppel, la cual fue patentada para comprimir la corriente de aire en la proximidad de los contactos y aprovechar así la rigidez dieléctrica del aire a presión.
- Hexafluoruro de azufre.- Existen diferentes compuestos gaseosos, entre los cuales resaltan SF_6 , F_{12} , CO_2 , CCl_2F_2 y otros cuya rigidez dieléctrica es muy elevada. Esto se debe fundamentalmente a la propiedad de estos compuestos de absorber electrones libres, los cuales transforman la molécula neutral en un ion negativo. De los gases y compuestos anteriormente citados el más difundido y que más se utiliza es sin lugar a dudas el SF_6 (Hexafluoruro de Azufre).
- Interruptor al vacío.- Los interruptores al vacío utilizan como medio de extinción un vacío de hasta 10^{-5} Torr (1 Torr = 1 mmHg), en el cual no se puede engendrar un plasma debido a la ausencia de los átomos que se requieren para la ionización.

4 NORMAS, ESPECIFICACIONES Y DEFINICIONES.

4.1. Normas

Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMIP-1999)

La norma oficial a la que se hace referencia nos indica las recomendaciones que debemos cumplir para la protección de subestaciones eléctricas:

Generalidades.

Las subestaciones deben tener un adecuado sistema de tierras al cual se deben conectar todos los elementos de la instalación que requieran la conexión a tierra para:

- a) Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra, ya sean debidas a una falla a tierra del sistema, o a la operación de un apartarrayo.
- b) Evitar que durante la circulación de corrientes de falla a tierra, puedan producirse diferencias de potencial en distintos puntos de la subestación (ya sea sobre el piso o con respecto a partes metálicas puestas a tierra) que puedan ser peligrosas para el personal, considerando que las tensiones tolerables por el cuerpo humano deben ser mayores que las tensiones resultantes en la malla.
- c) Facilitar la operación de los dispositivos de protección adecuados, para la eliminación de la falla a tierra.
- d) Proporcionar mayor confiabilidad y seguridad al servicio eléctrico.
- e) Evitar la aparición de potenciales en el neutro de un sistema en estrella aterrizado.

Los elementos principales del sistema de tierras son:

- 1) Red o malla de conductores enterrados, a una profundidad que usualmente varia de 0.30 a 1.0 m.

- 2) Electrodo de tierra, conectados a la red de conductores y enterrados a la profundidad necesaria para obtener el mínimo valor de resistencia a tierra.
- 3) Conductores de puesta tierra, a través de los cuales se hace la conexión a tierra de las partes de la instalación del equipo.
- 4) Conectores, para hacer las uniones entre los diferentes elementos de la red, pueden ser de compresión o soldables.

Características del sistema de tierras.

- a) Disposición física.- El cable que forme el perímetro exterior de la malla, deberá ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación, con ello se evita concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y las terminales cercanas.
La malla debe ser construida por cables colocados paralela y perpendicularmente, con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y formando retículas cuadradas perfectas.
Los cables que forman la malla deben colocarse perfectamente a lo largo de las hileras de estructuras o equipo, para facilitar la conexión a los mismos.
En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente entre sí y en los puntos adecuados conectarse a electrodos de tierra de 2.40 m de longitud mínima, clavados verticalmente. Donde sea posible, construir registros en los mismos puntos y como mínimo en los vértices de la malla.
En subestaciones tipo pedestal se requiere que el sistema de tierra quede confinado dentro del área que proyecta el equipo sobre el suelo.
Excepción: En las subestaciones tipo poste o pedestal se acepta como sistema de tierras la conexión del equipo a uno o más electrodos. La resistencia a tierra total debe cumplir con los valores del inciso c) de esta Sección.
- b) Las características de los sistemas de tierras deben cumplir con lo aplicable del artículo 250.

- c) Resistencia a tierra de la malla.- La resistencia total de la malla con respecto a la tierra debe determinarse tomando en cuenta los siguientes parámetros:
- Longitud total de elementos enterrados.
 - Resistividad eléctrica del terreno.
 - El área de la sección transversal de los conductores mínima aceptable es de 107.2mm^2 de cobre (4/0 AWG).
 - Profundidad.

La resistencia eléctrica total del sistema de tierra debe conservarse en un valor (incluyendo todos los elementos que forman el sistema) menor a : $25\Omega\text{-m}$ para subestaciones hasta 250 KVA y 34.5 KV, $10\Omega\text{-m}$ en subestaciones mayores de 250 KVA y HASTA 34.5 KV Y DE 5Ω en subestaciones que operen con tensiones mayores a 34.5 KV.

Deben efectuarse las pruebas necesarias para comprobar que los valores reales de la resistencia a tierra de la malla se ajustan a los valores que da el diseño; así mismo, repetir periódicamente estas pruebas para comprobar que se conservan las condiciones originales, a través del tiempo y de preferencia en época de estiaje, para verificar que se mantienen dentro de los límites aceptables.

Excepción: Para terrenos con resistividad mayor a $3000\ \Omega\text{-m}$, se permite que los valores anteriores de resistencia de tierra sean el doble para cada caso.

Puesta a tierra de cercas metálicas.

Debido a que las cercas metálicas son usualmente accesibles al público y pueden ocupar una posición sobre la periferia de la malla de tierras donde los gradientes de potencial son más altos, se deben tomar las siguientes medidas:

- a) Si la cerca se coloca dentro de la zona correspondiente a la malla se debe prolongar ésta a 1.50 m fuera de la cerca, como mínimo.
- b) Si la cerca se encuentra fuera de la zona correspondiente a la malla debe colocarse por lo menos a 2.0 m del límite de la malla.

Puesta a tierra de rieles y tuberías de agua.

- a) Rieles.- Los rieles de escape (espuelas) de ferrocarril que entren a una subestación no deben conectarse al sistema de tierras de la subestación, porque se transfiere un aumento de potencial a un punto lejano durante un corto circuito; o bien, si la puesta a tierra es en un punto lejano, se introduce el mismo peligro pero en el área de la subestación.

Para evitar estos riesgos deben aislarse uno o más partes de juntas de los rieles donde estos salen del área de la red de tierras.

- b) Tuberías de Agua.- Las tuberías metálicas de agua que estén enterradas dentro de la subestación deben ser conectadas al sistema de tierras de la misma subestación, perfectamente en varios puntos.

La misma regla debe seguirse con tuberías de gas y con las cubiertas metálicas de los cables que están en contacto con el terreno.

Puesta a tierra de partes no conductoras de corriente.

- a) Las partes metálicas expuestas que no conducen corriente, del equipo eléctrico, deben conectarse a tierra en forma permanente, tales como armazones de generadores y motores, cubiertas de tableros, tanques de transformadores e interruptores, así como las defensas metálicas del equipo eléctrico (incluyendo barreras, cercas de alambre, etc.).

- b) Con excepción de equipo instalado en lugares húmedos o lugares peligrosos, las partes metálicas que no conducen corriente, pueden no conectarse a tierra, siempre que sean normalmente inaccesibles o que se protejan por medio de resguardos, o bien, por las distancias que se señala para protección de partes vivas en la Sección 2404-1 a) de dicha norma.

Esta última protección debe impedir que se puedan tocar inadvertidamente las partes metálicas mencionadas y, simultáneamente, algún objeto conectado a tierra.

- c) Las estructuras de acero de la subestación, en general, deben conectarse a tierra.

4.2. Definiciones

- Ampacidad.- Es la corriente en amperes que un conductor puede conducir continuamente, bajo condiciones de trabajo, sin exceder su capacidad de temperatura.
- Potencial o Voltaje.- Es la cantidad o diferencia de fuerza eléctrica que existe entre dos puntos, la que se aplica a una carga eléctrica para que esta desarrolle un cierto trabajo.
- Bentonita.- Es un mineral industrial a base de arcillas plásticas, de grano fino, que se usa como una de las opciones que existen, para algunas instalaciones, como tratamiento químico para los electrodos de tierra. Las bentonitas de alto grano son: coloidales e higroscópicas, absorben hasta cinco veces su peso en agua.
- Tierra.- Una conexión conductora, intencional o accidental entre un circuito o equipo eléctrico y la tierra, o entre un circuito o equipo y algún cuerpo conductor que se utiliza como tierra.
- Tierra efectiva.- Conexión intencional a tierra, a través de un medio conductor a tierra, con una baja impedancia y una suficiente capacidad de corriente como para evitar elevaciones de potencial que puedan crear o generar peligro o daño a personas y equipo eléctrico.
- Resistividad eléctrica (suelo).- Es la resistencia que presenta un cubo de material de 1cm por cada lado. Se representa por la letra griega “ ρ ” y sus unidades son ohms-cm u ohms-m. Para darnos una idea de este parámetro, la resistividad es el inverso de la conductividad esto es: $\rho = \left(\frac{1}{\sigma}\right)$.

La resistividad de un suelo varia con respecto a:

1. La profundidad (a partir de la superficie).
2. El tipo y concentración de los químicos (solubles en el suelo).
3. La humedad.
4. La temperatura del suelo.

En otras palabras, la resistividad es el reflejo del electrolito en el suelo. Por lo tanto la presencia de agua no necesariamente indica una baja resistividad.

- **Código.-** Históricamente, se le define como una compilación o conjunto de leyes metódicas y sistemáticas, en el cual se reúnen o agrupan las leyes aplicables a una misma materia o naturaleza del objeto u objetos.
- **Descarga eléctrica peligrosa.-** Es aquella que puede sufrir una persona, y que puede producir daño o poner en riesgo la salud de la misma.
- **Estándar.-** Prácticas aceptables y reconocidas por los expertos en el área en cuestión. (Los códigos de construcción comúnmente, y a manera de referencia, incluyen un amplio rango de estándares).
- **Anillo de tierra.-** Es un electrodo de puesta a tierra. Consiste de un conductor desnudo calibre No.2 AWG que rodea el edificio y que esta a una profundidad de por lo menos 30 in.
- **Bus o terminación de neutro.-** Barra de cobre en el equipo de servicio o terminación, en la cual se conecta el conductor de puesta a tierra.

- Bus de tierra.- Barra de cobre en el equipo de servicio en el cual se puede conectar el conductor del electrodo de tierra, uniones y conductores de tierra de equipo.
- Conductor de electrodo de tierra.- Conductor que une el electrodo de tierra al conductor de puesta a tierra en el equipo de servicio o en la fuente de un sistema interno separado.
- Conductor de puesta a tierra.- Conductor intencionalmente conectado a tierra. Generalmente coincide con el conductor del neutro.
- Conductor de tierra de equipo.- Conductor utilizado para conectar las partes metálicas del equipo, que no conducen corriente en condiciones normales (carcazas, charolas, y otras cubiertas metálicas).
- Dispositivo de desconexión principal.- Es el primer interruptor termo-magnético o la primera combinación fusible-interruptor dentro del equipo de servicio en el cual terminan los cables de alimentación.
- Electrodo de tierra artificial.- Es un electrodo de tierra que consiste generalmente en una barra conductora enterrada que se usa cuando los electrodos de tierra tradicionales o preferidos no están disponibles.
- Terminal de tierra.- La parte del sistema de protección tal como una varilla, placa o conductor, instalado para proveer contacto con la tierra.

- Zona de protección.- El espacio adyacente al sistema de protección que es sustancialmente inmune a los disturbios de las descargas eléctricas.

4.3. Especificaciones

Materiales:

- Electroodos.
- Placas metálicas.
- Conductores
- Bus de tierra.
- Conductor a tierra.

Varilla de Copperweld (electrodos).

Las varillas deberán ser de marca Copperweld o similares, según ANSI-C 33-8-1972:

- 16 mm (5/8") de diámetro y 2.40 m (8 ft) de largo.
- 16 mm (5/8") de diámetro y 3.05 m (10 ft) de largo.
- 19 mm (3/4") de diámetro y 2.40 m de largo.
- 19 mm (3/4") de diámetro y 3.05 m (10 ft) de largo.

Hierro (Placa metálicas).

Acero al carbón (Placas metálicas).

Metales no ferrosos: Cobre (Placas metálicas).

Cable de cobre marca Condumex (Conductores).

Deberán ser fabricados por Condumex o similar, de cobre, cableado, desnudo, y en calibres estipulados por las normas y los planos del proyecto.

Temple duro (Bus de tierra).

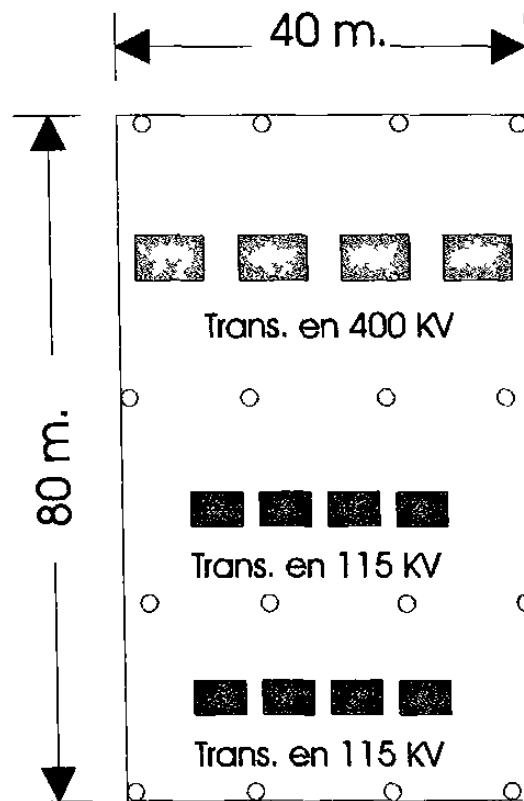
Temple suave (Conductor de tierra).

5 PRESENTACION DEL PROBLEMA.

5.1. Descripción, localización y condiciones del sistema de protección.

5.1.1. Equipo de la subestación.

La subestación que hacemos referencias corresponde a una de tipo primaria, receptora, de corriente alterna, a intemperie, la cual cuenta con cuatro transformadores den 400KV con una capacidad de +++MVA, cada uno de ellos además de otro grupo de transformadores en 115KV y 230KV, ocho en total.



Disposición de equipo
(Transformadores y postes)

Fig. 5.1

5.1.2. El edificio.

No se encuentre edificio alguno, es simplemente una área cercada con malla ciclónica para protección de la zona de la subestación, el suelo esta formado por una capa de relleno de desechos de origen minera de la misma planta como aislante entre el equipo y la malla de tierra; cuenta con una serie de postes de 12 a 15 m de alto en cuya punta se encuentran montados los pararrayos del tipo alfiler, (17 en total), conectados entre sí formando el equivalente a una malla rectangular de protección.

5.2. Localización.

5.2.1. Ubicación de la subestación.

Esta se encuentra localizada en la parte Este del área de la planta, cuenta con una superficie total de 3200 m^2 , de forma rectangular con un ancho de 40 m y una longitud de 80 m. A ella llegan dos circuitos de energía uno en 115KV y otro en 400KV. (Ver figura 5.2)

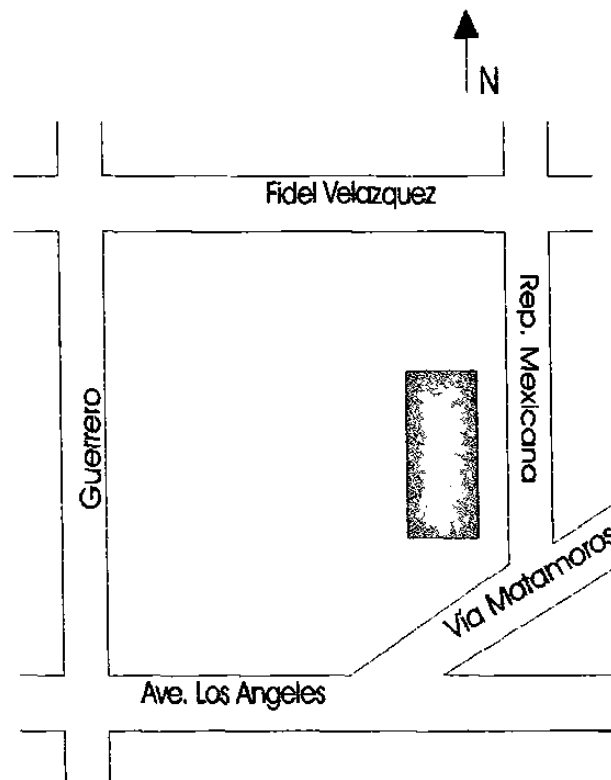
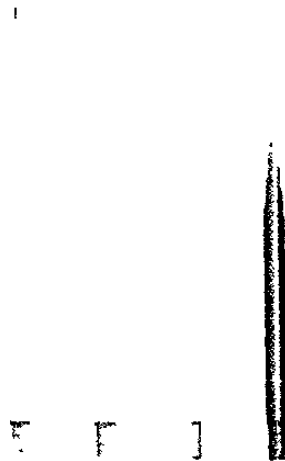


Fig. 5.2

5.3. Condición actual del sistema de potencia.

5.3.1. Pararrayos.

Cuenta con una serie de postes de 12 a 15 m de alto en cuya punta se encuentran montados los pararrayos del tipo alfiler, (17 en total), conectados entre sí formando el equivalente a una malla rectangular de protección.



Puntas Alfiler

Fig. 5.3

5.3.2. Apartarrayos.

Cada Transformador cuenta con sus respectivos apartarrayos del tipo autovalvular conectados a cada una de las líneas formando una conexión estrella en donde el otro extremo se une de manera común a la bajante o conductor a tierra, seleccionados de acuerdo al nivel de potencial del circuito al que estén conectados.

5.3.3. Malla o red de tierra.

Hasta el momento no se tiene ninguna información acerca de la existencia de una red de tierras, la cual por supuesto debe existir por norma, debido a la situación anteriormente mencionada en el párrafo de la síntesis,

a simple vista no se vislumbra malla alguna, con la cual comparar las mediciones de ambos arreglos.

6 DISEÑO

6.1 Criterios de diseño.

Así como se a indicado en capítulos anteriores existen dos principales metas en el diseño que deben ser conseguidas, para cualquier sistema de tierras de una subestación bajo condiciones de funcionamiento normal como de falla. Estas son: (1) suministrar, esto es, disipar las corrientes eléctricas dentro de la tierra sin exceder los limite del equipo y de su operación, y (2) el de asegurar que las personas en la vecindad del sistema de tierras, no sean expuestas a los peligros de descargas eléctricas.

El diseño debe suministrar seguridad, considerando los lugares de riesgo o peligro y con los potenciales de contacto de la subestación. Así como la posibilidad de que aparezcan potenciales de transferencia que excedan el GPR (Elevación del potencial de rejilla) de la subestación durante la falla, este deberá considerar los métodos utilizados para proteger al personal y al equipo de estos potenciales de transferencia. El procedimiento de este diseño esta sustentado en las consideraciones de seguridad en zonas peligrosas y potenciales de contacto, también las zonas exteriores inmediatas, y el área cercada de la subestación. Como el potencial de malla es el peor voltaje de contacto que podemos tomar dentro de la subestación, este debe ser usado como base para el calculo del diseño.

Los potenciales de paso son inherentemente menos peligrosos que los de malla. Como siempre lo que se busca es la seguridad en el área

145441

aterrizada, y esta es obtenida con la ayuda de una capa superficial de alta resistencia (terreno rocoso o grava), el cual no se extiende por fuera de la cerca, entonces los potenciales de paso se hacen peligrosos. En cualquier evento, el potencial de paso calculado deberá ser comparado con el potencial de paso permisible después de que la rejilla a sido diseñada para satisfacer los criterios del potencial de contacto.

Para espacios iguales de una rejilla de tierra, el potencial de la malla se incrementa a lo largo de esta desde el centro hacia las esquinas. El rango de este incremento depende del tamaño de la rejilla, del número y colocación de las varillas de tierra, del espacio entre los conductores en paralelo, del diámetro y profundidad de los conductores, y del perfil de resistividad de la tierra.

Los parámetros involucrados o que tienen un substancial impacto en el diseño de la rejilla son: máxima corriente de rejilla (I_g), la duración de la falla (t_f), la duración de la descarga (t_s), resistividad del terreno (ρ), alta resistividad de la capa superficial del terreno (ρ_s), y la forma de la rejilla. Son muchos los parámetros que definen la forma de la rejilla, para el área del sistema de tierras; el espaciamiento de los conductores, y la profundidad de la rejilla, tiene mayor impacto sobre el potencial de malla, mientras que los parámetros como el diámetro del conductor y el espesor de la superficie del material, tienen un menor impacto.

Máxima corriente de rejilla (I_g).- Se considera al valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la rejilla de tierra de la subestación dentro de la tierra.

Duración de la falla (t_f), y duración de la descarga eléctrica (t_s).- La duración de la falla y de la descarga son normalmente consideradas como iguales, a no ser que la duración de la falla sea la suma de descargas sucesivas, como lo es los re-cierres. La selección de t_f deberá reflejar la rápida estabilización de la transmisión en la subestación y el lento tiempo de recuperación para subestaciones de distribución e industriales. La elección de t_f y t_s son el resultado de la mayor combinación pesimista del factor de decremento de la corriente de falla y de la corriente permitida por el cuerpo humano. Los valores típicos de t_f y t_s están dentro del rango de 0.25-1.0 segs.

Resistividad de tierra (ρ).- La resistencia de la rejilla y los gradientes de potencial dentro de una subestación son directamente dependientes de la resistividad del terreno. En realidad la resistividad del terreno varia tanto vertical como horizontalmente, será necesario adquirir suficientes datos para el área de la subestación.

Desde que se simplificaron las ecuaciones para la obtención de los potenciales de malla (E_m) y de paso (E_s), se asume que la resistividad de la tierra es uniforme, las ecuaciones solamente podrán emplear uno de los valores para una resistividad dada. No existe un método sencillo para determinar su valor, según los datos de pruebas de campo, los cuales

pueden ser considerados como una aproximación en el análisis de la rejilla de tierra mediante el uso de una ecuación simplificada. Como siempre, los siguientes puntos deben ser considerados para ser usados junto con la guía general:

(1) El terreno puede ser considerado como uniforme si la diferencia de los valores obtenidos de resistividad entre los dos extremos del campo de prueba es del 30% o menor. En este caso solo se utiliza un porcentaje de los valores de resistividad del terreno.

(2) Cuando se tiene un modelo equivalente a un terreno de dos capas al que se desea determinar su resistividad y en el cual el sistema de tierra es colocado en la capa superior del mismo, el valor de la resistividad de la capa superior (ρ_s) puede ser usado en la ecuación. Para valores negativos del factor de reflexión (k), las rejillas ya diseñadas usan el análisis de tierra uniforme el cuales deberá considerar altos potenciales de paso y de contacto, con el solo hecho de considerar el valor de (ρ), con lo cual estamos diciendo que el terreno es uniforme.

Resistividad de la capa superficial (ρ_s).- Una delgada capa superficial de rocas molidas o grava ayuda a limitar la corriente del cuerpo mediante la suma de una resistencia a la resistencia equivalente del cuerpo. Valores entre los 1000 a 5000 Ω -m han sido usados como referencia para ρ_s .

Forma de la rejilla.- En realidad las limitaciones sobre los parámetros físicos de una rejilla de tierras son basadas en la economía y los límites físicos de su instalación. Los límites económicos son: no es práctico instalar

un sistema de tierras mediante el uso de una placa de cobre. Por ejemplo, las excavaciones de las trincheras dentro del cual el material conductor es tendido, limitan el espaciado del conductor a aproximadamente 2 metros o más. El rango típico de espaciado de los conductores esta entre los 3 – 15 m, mientras que la profundidad de la rejilla esta entre los 0.5 – 15 m. Para un conductor típico con un calibre AWG desde 2/0 – 500 KCMC, el diámetro del conductor tiene un efecto insignificante sobre el potencial de malla. El área del sistema de tierras es el factor geométrico más importante en la determinación de la resistividad de la rejilla. El largo del área aterrizada, la baja resistividad de la rejilla, así como, el bajo GPR y el potencial de malla.

6.2 Estudio Geo-técnico. (resistividad eléctrica del terreno)

6.2.1. Estudio y medición de la resistencia eléctrica.

La resistividad eléctrica del suelo que rodea un electrodo de tierra, es uno de los parámetros más importantes que el diseñador no puede dejar de omitir. Esto es debido a la gran influencia que tiene sobre la resistencia del electrodo y la del gradiente de potencial en la superficie del suelo.

Recordemos que el principal objetivo del diseño de una red de tierras es el de limitar estos parámetros a valores seguros o tolerables.

Resistividad eléctrica.- Es la resistencia de un volumen de materia cuya área tenga una sección transversal y longitud unitaria.

De la ecuación: $R = \frac{\rho L}{A}$ Ec. 6.1

De donde: $\rho = \frac{RA}{L}$ Ec. 6.2

Para el sistema métrico: ρ = Resistividad eléctrica (Ω -m)

R = Resistencia (Ω)

A = área transversal (m²)

L = Longitud (m)

La resistividad del terreno para el diseño de una red de tierras, generalmente se determina mediante la correcta interpretación de los datos de campo. Ya que la resistividad del terreno varía tanto horizontal como verticalmente, se tiene que establecer un perfil de resistividad del suelo, los cuales se obtienen de pruebas en distintos lugares del área de la subestación y hasta cierta profundidad.

Efecto del gradiente de potencial.- La resistividad del suelo no se ve afectada por los gradientes de potencial, a menos que este exceda un cierto valor crítico. Este valor cambia algunas veces según sea el tipo de material del suelo, generalmente adopta valores de miles de voltios por centímetro. Una vez que se excede este valor, se desarrolla un arco en la superficie del electrodo el cual avanza dando como resultado un alargamiento de este haciendo que cambie el tamaño efectivo del electrodo ya que este avanza hacia tierra, hasta que los gradientes disminuyen a rangos de potencial que el suelo puede soportar.

Debido a que los sistemas de tierras son diseñados para cumplir con rangos más rigurosos de voltajes como lo son los potenciales de paso y de contacto, el gradiente se supone que esta por debajo del valor crítico.

Efecto de la magnitud de corriente.- La resistividad del suelo en la vecindad de un electrodo de tierra puede verse afectado por las corrientes que fluyen de los electrodos hacia el terreno que los rodea. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo, determinan la magnitud y duración de una corriente dada, provocando que el terreno pierda humedad y por lo tanto incrementar su resistividad. Un típico valor de densidad de corriente es aquel que no deba exceder los 200 A/m² en 1 seg.

6.2.2. Metodología de uso común.

Técnicas de medición de la resistividad.- La información de campo obtenida en el lugar en donde se va a ubicar la subestación, es esencial para determinar la composición del suelo, y obtener una idea básica de su homogeneidad. Las muestras obtenidas para otros tipos de estudios pueden ser de utilidad, pues nos proporcionan información acerca de las diferentes capas del suelo, permitiéndonos establecer un índice acerca del posible rango de resistividad.

La resistividad del suelo que se usa den él calculo de la red de tierras, es obtenida generalmente de las pruebas de campo. Debido a que existen variaciones en cuanto a la composición del suelo en función de la longitud y

profundidad de este, es necesario realizar pruebas en distintos lugares dentro del área que será aterrizada. Entre mayor sea la cantidad de datos obtenidos tendremos una gran precisión en cuanto al modelo de suelo que se utilizara en el diseño de nuestra red. Existen dos métodos para la medición del terreno:

1.- Método de cuatro puntos o Método de Wenner.

Este método es el más utilizado para obtener la resistividad promedio del terreno. Se entierran pequeños electrodos a una profundidad “B” y a una distancia en línea recta con intervalos de “A” metros. Se hace circular una corriente de prueba “I” entre los electrodos exteriores y se mide con un voltímetro de alta impedancia la tensión entre los electrodos internos. La relación V/I nos dará el valor de resistencia en ohms.

Existen dos variantes en este método:

- a.- Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner, del cual hablaremos.
- b.- Electrodos espaciados desigualmente o arreglo de Schlumberger-Palmer.

Arreglo de Wenner.

Con este arreglo, los electrodos están espaciados a igual distancia uno del otro como lo muestra la figura 6.1. Si “A” es la distancia entre electrodos adyacentes, la resistencia en términos de unidades de longitudes que “A” y “B” se midan será:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1+2A\sqrt{(A^2+4B^2)}-A\sqrt{(A^2+B^2)}} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Si "A" y "B" se miden en cms, o en m y la resistencia en ohms, la resistividad estará dada en ohms-cm o en ohms-m respectivamente.

Si la longitud "B" es mucho menor que la de "A", puede suponerse que $B=0$ y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR$$

Ec. 6.4

Metodo Wenner

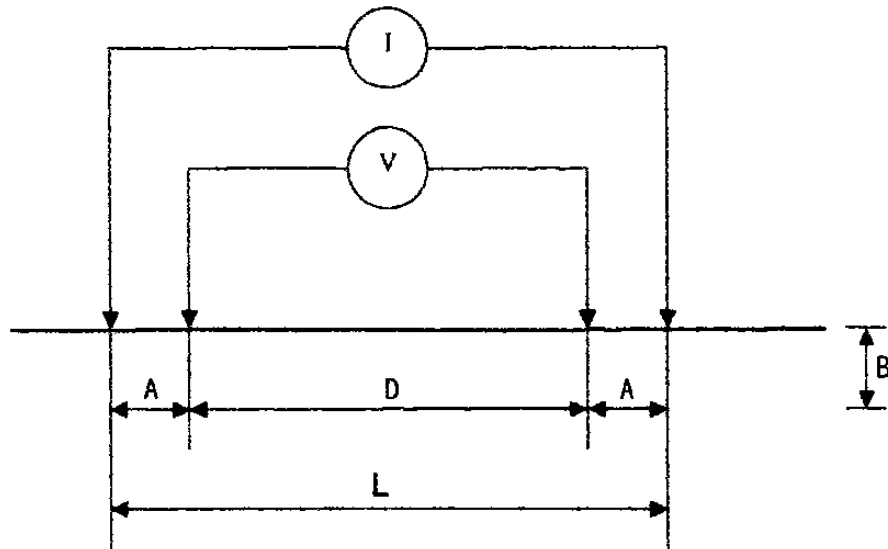


Fig. 6.1

2.- Método de tres puntos o caída de potencial.

En este método la profundidad "L" de la varilla de prueba es variable, las otras dos varillas, conocidas como varillas de referencia, se entierran a una profundidad "b" y en línea recta con la varilla de prueba.

La varilla de referencia de tensión deberá localizarse a 62% de la distancia entre la varilla de referencia de corriente y la varilla de prueba. Para minimizar la interferencia entre electrodos, la varilla de referencia de corriente deberá localizarse al menos a una distancia de $5L$ de la varilla de prueba.

Estas especificaciones para la localización de las varillas de referencia están basadas en la suposición de un suelo uniforme.

Metodo de Tres Puntos o Caída de Potencial.

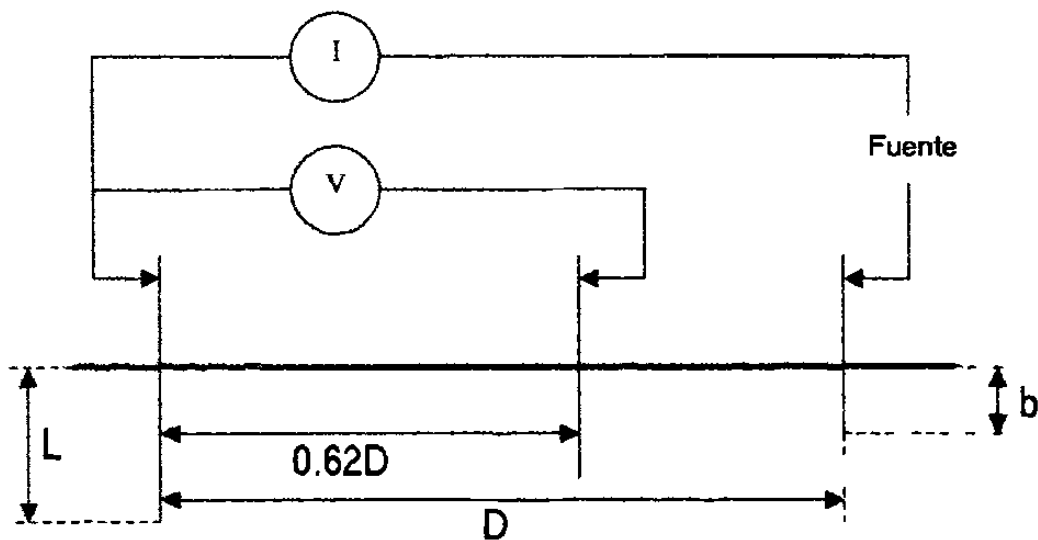


Fig. 6.2

Resistencia de una varilla.

En el suelo uniforme de resistividad ρ , la resistencia a tierra de una varilla de diámetro " d " y enterrada una longitud " L ", esta dada por la formula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L \ln\left(\frac{2.943L}{d}\right)} \quad \text{Ec. 6.5}$$

Tabla de la resistividad de materiales que suelen ser colocados por encima del suelo para incrementar la seguridad.

No.	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL SUPERFICIAL	RESISTIVIDAD DE LA MUESTRA (ohms-m.)	
		SECO	MOJADO
1	Aglomerado corrido de granito grano fino.	140×10^6	1300
2	Granito lavado #57 similar a la grava.	190×10^6	8000
3	Piedra laja gruesa ligera y limpia #2	7×10^6	2000 3000
4	Granito lavado similar a la grava de $\frac{3}{4}$ in.	2×10^6	10000
5	Granito lavado similar a la grava PC.	40×10^6	5000
6	Aglomerado a base de granito. (grano fino)		5600-1000
7	Concreto	2000 10000	50-100
8	Concreto	1200 280000	21-63
9	Asfalto		10000
10	Asfalto	2×10^6 30×10^6	10000 a 6×10^6

Tabla 6.1

6.3. Estudio de corto circuito.

La determinación de las corrientes de corto circuito en un sistema de distribución de energía eléctrica es tan básico e importante como el de la

determinación de las corrientes de carga a las que va a estar sometida la planta, es parte fundamental en la selección de interruptores, fusibles, y arrancadores de motores. La magnitud de la corriente de corto circuito es, a veces fácil de determinar, y esta es un índice para saber que tan grande será la corriente de carga.

La forma de determinar la corriente de falla deberá ser de manera simple comparada contra los ya conocidos métodos tradicionales usados hasta hoy, sin importar el tamaño y complejidad de la planta.

Si se suministra la adecuada protección a la planta, la capacidad de esta deberá ser considerada para determinar que tanta corriente de corto circuito será permitida. Esto se hace para que los interruptores y fusibles sean seleccionados con una capacidad de interrupción adecuada. Esta capacidad interruptiva deberá ser alta, para permitir la segura apertura de la máxima corriente de corto circuito, cuando esta fluye a través del interruptor del circuito a la hora que ocurre la falla en el alimentador o sobre el equipo que se está protegiendo.

La magnitud de la corriente de carga está determinada por la cantidad de trabajo que será realizado, y por la pequeña relación que existe entre la capacidad de la planta y la carga conectada. Como siempre, el valor de la corriente de corto circuito es totalmente independiente de la carga y está directamente relacionada con la capacidad de la fuente de energía.

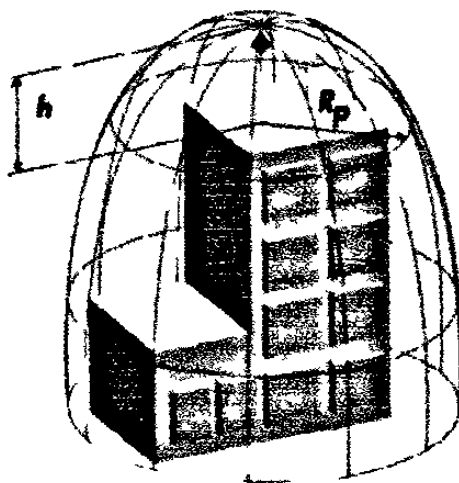
6.4. Selección de protecciones.

6.4.1. Pararrayos.

La protección contra los rayos o perturbaciones atmosféricas, es esencial para la protección de edificios, líneas de transmisión, y para el equipo.

En la actualidad, la forma más eficiente para determinar las zonas de protección contra descargas atmosféricas, es el uso de un modelo llamado Modelo Electrogeométrico. Este se basa en las normas que se usan en la mayoría de los países de Europa, como entre otras la norma francesa NFC-17-100. En la práctica se pueden adoptar los siguientes criterios generales:

- Una punta de pararrayos simple instalada en la azotea de una construcción tendrá una zona de protección determinada por un cono de semiángulo de 60° tomado a partir de la cima de la punta.
- Una punta simple instalada a nivel del piso tendrá una zona de protección determinada por un cono de semiángulo de 45° .



CONO SEMIANGULAR DE 60°

Fig. 6.3

En la tabla No. 6.1 se muestra algunos valores de radios de protección para un modelo y fabricante dado.

Tabla de radios de protección

MODELO	h: Altura de la punta (m)						
	2	4	6	8	10	12	15
	r: Radio de protección (m)						
PREVECTRON S6	21	42	62	83	104	125	156
PREVECTRON S4	14	28	42	56	70	80	104
PREVECTRON "TOP SET"	11	21	31	42	52	62	78

Tabla 6.2

El sistema se compone de:

- a) Terminales de tierra.
- b) Conductores de bajada.
- c) Terminales de tierra.
- d) Conductores de interconexión.

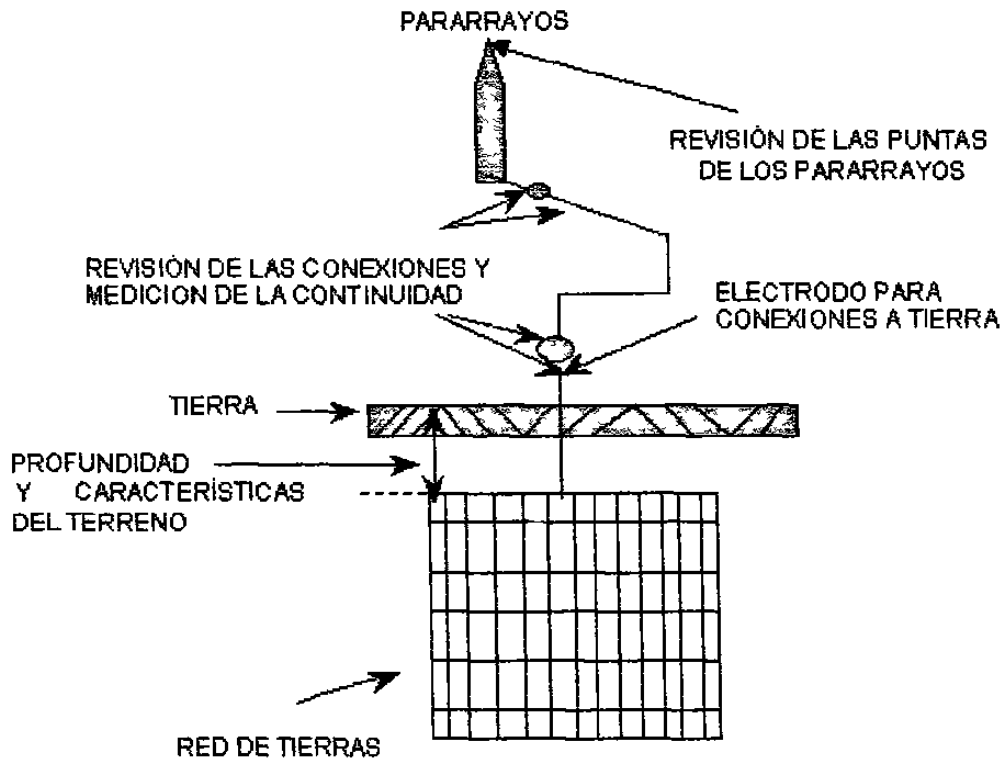


Fig. 6.4

Esquema simplificado de protección por pararrayo.

Terminal de tierra.- Es el componente del sistema de protección que intenta interceptar la descarga eléctrica.

Bonding.- Conexión eléctrica entre un objeto conductor eléctrico y un componente del sistema de protección intentando reducir la diferencia de potencial creada por la corriente del rayo.

Materiales de Clase I.- Conductores de rayos, terminales de aire y materiales asociados para proteger estructuras de no más de 23 m de altura.

Class I Material Requirements

Type of Conductor		Copper		Aluminum	
		Standard	Metric	Standard	Metric
Air Terminal, Solid	Min. Diameter	3/8 inch	9.5 mm	1/2 inch	12.7 mm
Air Terminal, Tubular	Min. Diameter	5/8 inch	15.9 mm	5/8 inch	15.9 mm
	Min. Wall Thickness	.033 inch	0.8 mm	.064 inch	1.6 mm
Main Conductor, Cable	Min. Size ea. Strand	17 AWG		14 AWG	
	Wgt. per Length	167 lbs./1000 ft.	276 g/m	95 lbs./1000 ft.	141 g/m
	Cross Sect. Area	57.400 CM	29 mm ²	96.600 CM	50 mm ²
Main Conductor, Solid Strip	Thickness	16 AWG		14 AWG	
	Width	1 inch	25.4 mm	1 inch	25.4 mm
Bonding Conductor, Cable (solid or stranded)	Min. Size ea. Strand	17 AWG		14 AWG	
	Cross Sect. Area	26.240 CM		41.100 CM	
Bonding Conductor, Solid Strip	Thickness	16 AWG		14 AWG	
	Width	1/2 inch	12.7 mm	1/2 inch	12.7 mm

Tabla 6.3

Materiales de Clase II.- Semejante a los de clase I pero para alturas mayores a 23 m de altura.

Class II Material Requirements

Type of Conductor		Copper		Aluminum	
		Standard	Metric	Standard	Metric
Air Terminal, Solid	Min. Diameter	1/2 inch	12.7 mm	5/8 inch	15.9 mm
Main Conductor, Cable	Min. Size ea. Strand	15 AWG		13 AWG	
	Wgt. per Length	375 lbs./1000 ft.	556 g/m	190 lbs./1000 ft.	283 g/m
	Cross Sect. Area	115.000 CM	58 mm ²	192.000 CM	97 mm ²
Bonding Conductor, Cable (solid or stranded)	Min. Size ea. Strand	17 AWG		14 AWG	
	Cross Sect. Area	26.240 CM		41.100 CM	
Bonding Conductor, Solid Strip	Thickness	16 AWG		14 AWG	
	Width	1/2 inch	12.7 mm	1/2 inch	12.7 mm

Tabla 6.4

Conductores Bonding.- UN conductor que es usado para igualar el potencial entre cuerpos metálicos aterrizados y el sistema de protección contra rayos.

Conductor principal.- Un conductor usado para llevar la corriente del rayo entre las terminales de aire y las de tierra.

Estructuras que no excedan los 7.6 m de altura, su zona de protección se determina por un cono formado una relación de 2:1.

Estructuras que no excedan los 15 m de altura su zona de protección se determinan por un cono cuya relación es de 1:1.

Las terminales de aire deben colocarse en la superficie del techo de la estructura con una separación no mayor a 6 m. Excepto para terminales de aire de 24 pulgadas o más grandes se pueden colocar cada 7.6 m de separación y colocarse cuando menos a 0.6m de las orillas.

Para techos planos o de poca inclinación que exceda a 15 m de ancho o de largo deben colocarse terminales adicionales de aire en intervalos que no excedan a 15 m.

Cuando determine el perímetro de una estructura, mida solamente el perímetro del área del techo que requiere de protección. Techos bajos o proyecciones que están bajo una zona de protección, deben ser excluidos.

Con respecto al número de conductores de bajada, por lo menos dos conductores de bajada se deben proporcionar en cualquier estructura.

En estructuras que excedan los 76 m en perímetro estos deben tener un conductor de bajada cada 30 m de perímetro o fracción. La cantidad total de conductores de bajada en estructuras de techo plano o levemente inclinado debería ser tal que la distancia promedio entre todos los conductores de bajada sea de 30 m.

Estructuras de formas irregulares pueden necesitar conductores de bajada adicionales, para proveer un camino doble a tierra por cada terminal de aire.

Otro parámetro que es importante considerar es el que corresponde al índice de riesgo de la presencia de rayos en la zona. Por lo tanto se anexa una guía para la determinación del índice de riesgo. Esta guía a sido preparada como ayuda a los criterios de análisis de los riesgos o pérdidas debidos a los rayos.

Si la estructura se encuentra dentro de una zona de alto riesgo, el índice de riesgo "R" deberá ser calculado para una gran gama de estructuras que se encuentren concentradas dentro de este ambiente. Por lo tanto el índice de la estructura deberá ser comparado con los índices de otras estructuras para poder decidir el peso del riesgo de la localidad que será considerado.

El cálculo del índice de riesgo “R” esta dado por la tabla I-2. El índice es obtenido dividiendo la suma de los valores dados en las tablas I-2(a) a la I-2(e) entra el índice de frecuencia de la presencia de rayos, valor que se obtiene de la tabla I-2(f).

El índice de riesgo es:

$$R = \frac{A + B + C + D + E}{F}$$

La tabla I-2 corresponde a los valores típicos del índice de riesgo. La tabla I-2(a) represente el tipo de estructura del edificio o construcción. En la tabla I-2(b) el tipo de material de la construcción. En la I-2(c) se indica su localización relativa. Para la I-2(d) el tipo de topografía. La I-2(e) representa el uso de la construcción. Finalmente en la tabla I-2(f) aparece la frecuencia con que aparecen las tormentas eléctricas (rayos).

Table I-2
Assessment of Risk, R

<i>R Value</i>	<i>Risk Value</i>
0-2	Light
2-3	Light to Moderate
3-4	Moderate
4-7	Moderate to Severe
Over 7	Severe

Tabla 6.5 (I-2)

Table I-2(a)
Index "A" — Type of Structure

Structure	Index Value
Single family residence less than 5,000 sq ft (465 m ²)	1
Single family residence over 5,000 sq ft (465 m ²)	2
Residential, office, or factory building less than 50 ft (15 m) in height:	
Covering less than 25,000 sq ft (2323 m ²) of ground area	3
Covering over 25,000 sq ft (2323 m ²) of ground area	5
Residential, office, or factory building from 50 to 75 ft (15 to 23 m) high	4
Residential, office, or factory building from 75 to 150 ft (23 to 46 m) high	5
Residential, office, or factory building from 150 ft (46 m) or higher	8
Municipal services buildings, fire, police, water, sewer, etc.	7
Hangars	7
Power generating stations, central telephone exchanges	8
Water towers and cooling towers	8
Libraries, museums, historical structures	8
Farm buildings	9
Golf shelters and other recreational shelters	9
Places of public assembly such as schools, churches, theaters, stadiums	9
Slender structures such as smokestacks, church steeples and spires, control towers, lighthouses, etc.	10
Hospitals, nursing homes, housing for the elderly or handicapped	10
Buildings housing the manufacture, handling, or storage of hazardous materials	10

Tabla 6.6 (I-2a)

Table I-2(b)
Index "B" — Type of Construction

<i>Structural Framework</i>	<i>Roof Type</i>	<i>Index Value</i>
Nonmetallic (Other than wood)	Wood	5
	Composition	3
	Metal — not continuous	4
	Metal — electrically continuous	1
Wood	Wood	5
	Composition	3
	Metal — not continuous	4
	Metal — electrically continuous	2
Reinforced Concrete	Wood	5
	Composition	3
	Metal — not continuous	4
	Metal — electrically continuous	1
Structural Steel	Wood	4
	Composition	3
	Metal — not continuous	3
	Metal — electrically continuous	1

NOTE: Composition roofs include asphalt, tar, tile, slate, etc.

Table 6.7 (I-2b)

Table I-2(c)
Index "C" — Relative Location

<i>Location</i>	<i>Index Value</i>
Structures in areas of higher structures:	
Small structures — covering ground area of less than 10,000 sq ft (929 m ²)	1
Large structures — covering ground area of more than 10,000 sq ft (929 m ²)	2
Structures in areas of lower structures:	
Small structures — covering ground area of less than 10,000 sq ft (929 m ²)	4
Large structures — covering ground area of more than 10,000 sq ft (929 m ²)	5
Structures extending up to 50 ft (15.2 m) above adjacent structures or terrain	7
Structures extending more than 50 ft (15.2 m) above adjacent structures or terrain	10

Table 6.8 (I-2c)

Table I-2(d)
Index "D" — Topography

<i>Location</i>	<i>Index Value</i>
On flat land	1
On hillside	2
On hill top	4
On mountain top	5

Table I-2(e)
Index "E" — Occupancy and Contents

	<i>Index Value</i>
Noncombustible materials — unoccupied	1
Residential furnishings	2
Ordinary furnishings or equipment	2
Cattle and livestock	3
Small assembly of people — less than 50	4
Combustible materials	5
Large assembly of people — 50 or more	6
High value materials or equipment	7
Essential services — police, fire, etc.	8
Immobile or bedfast persons	8
Flammable liquids or gases — gasoline, hydrogen, etc.	8
Critical operating equipment	9
Historic contents	10
Explosives and explosive ingredients	10

Table I-2(f)
Index "F" — Lightning Frequency
Isoceraunic Level (See isoceraunic map.)

	<i>Index Value</i>
0-5	9
6-10	8
11-20	7
21-30	6
31-40	5
41-50	4
51-60	3
61-70	2
Over 70	1

Tablas 6.9 (I-2d), 6.10 (I-2e), 6.11 (I-2f)

Para seleccionar de la tabla I-2(f) la frecuencia de los rayos es necesario referirnos al mapa que muestra estadísticamente el número de días con tormentas para la zona donde será ubicada la subestación. La siguiente figura corresponde a lo antes mencionado.

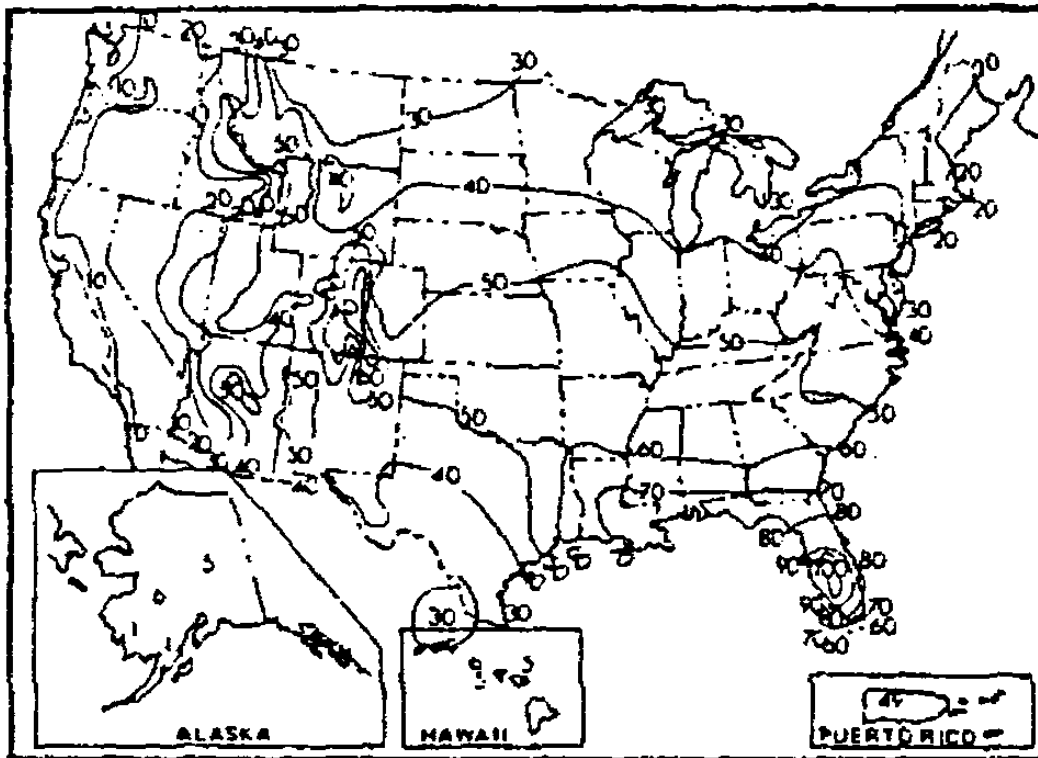


Fig. 6.5

6.4.2. Apartarrayos.

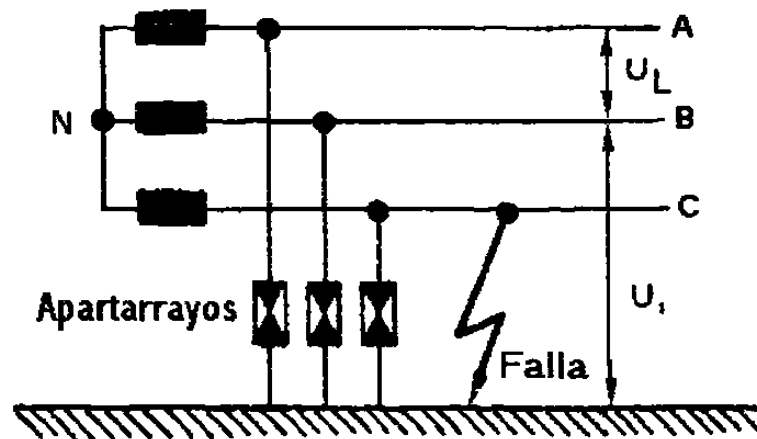
La selección de la tensión de diseño del apartarrayos es de vital importancia, ya que ella determina el grado de protección del mismo y también su costo. Bajo ningún aspecto el apartarrayos debe verse expuesto, en servicio a una tensión o sobretensión de frecuencia fundamental, 50 o 60 Hz, que exceda su tensión de extinción, pues de lo contrario el apartarrayos se vería sometido a una sobrecarga. Si dicha sobrecarga excede el límite de

descompresión que puede manejar las membranas internas y la válvula de alivio, el encapsulado de porcelana explota.

En vista de que el apartarrayos se puede conectar de diferentes maneras, es prudente diferenciar las más usuales:

Conexión entre fase y tierra.

Es sin lugar a dudas, la más usada o acostumbrada de las conexiones en los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Entre los conductores activos y tierra se emplazan tres apartarrayos, según se indica en la figura 6.6. La tensión de fase a tierra es entonces determinada en la selección de la tensión de dicho apartarrayos, pero también al tratamiento que se le haya dado al neutro del sistema, debido a los incrementos de tensión en las fases sanas, cuando tenga lugar, por ejemplo, una falla a tierra monofásica.



Conexión a tierra y coeficiente de conexión a tierra

Fig. 6.6

A continuación se citara brevemente los diferentes esquemas de instalaciones a tierra, para analizar la incidencia de éstos sobre el coeficiente de aterramiento “m” y la selección del apartarrayos.

El coeficiente de aterramiento “m” está dado por la siguiente expresión:

$$m = \frac{U_1}{U_L} \quad \text{Ec. 6.6}$$

E indica, por consiguiente, la relación que existe entre la tensión de fase a tierra, de cualquiera de las fases no afectadas por la falla a tierra, contra la tensión de línea de las fases sanas.

1. Sistema con neutro rígidamente conectado a tierra.- Corresponden a los sistemas comerciales de alta, extra alta y ultra alta tensión. Al ocurrir la falla a tierra, en cualquiera de las fases, no existe desplazamiento del neutro hacia la fase afectada, ya que el neutro de por sí se encuentra solidamente aterrizado. Las fases sanas, por consiguiente, no sufren ningún incremento de tensión y el coeficiente de aterramiento es $m < 0.8$. La tensión de diseño (disparo) del pararrayos se selecciona entonces de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U_d = KU_L = 0.8(U_L) \quad \text{ya que } k = 0.8 \quad \text{Ec. 6.7}$$

2. Sistema con instalación a tierra semirrígida.- En estos sistemas se encuentra conectada una resistencia (R) entre el neutro y la tierra, la cual

limita la intensidad de corriente de falla. Al sobrevenir una falla a tierra monofásica, las tensiones en las fases sanas sufren un ligero incremento, proporcional a la caída de tensión en R. El coeficiente de instalación a tierra de estos sistemas oscila entre 0.8 y 1, y la tensión de disparo se selecciona de acuerdo con:

$$U_d = kU_L = (0.8 \dots\dots\dots 1.0)U_L \quad \text{Ec. 6.8}$$

3. Sistemas con conexión inductiva a tierra.- La bobina Petersen, que compensa reactivamente la corriente de falla, en caso de una perturbación en el sistema no impide el incremento de tensión en las fases sanas, de allí que el coeficiente de conexión a tierra de estos sistemas sea igual a 1 ($m = 1$). La selección del apartarrayos se hace de acuerdo con la siguiente recomendación:

$$U_d = kU_L = 1.0(U_L) \text{ ya que } k = 1 \quad \text{Ec. 6.9}$$

4. Sistemas con neutro flotante.- Estos sistemas, denotan un incremento de $\sqrt{3}$ en la tensión de las fases sanas, al suceder una falla a tierra monofásica. La selección de la tensión de disparo del apartarrayos se hace con base en:

$$U_d = kU_L = 1.1(U_L) \text{ ya que } k \approx 1.1 \quad \text{Ec. 6.10}$$

5. Sistemas con características especiales.- Estos sistemas, entre los cuales destacan aquellos con líneas de longitud apreciables, interconexión de

bancos de condensadores en serie, puestas a tierra múltiples, cuatro conductores, conexión en estrella con neutro común, conexión en Delta, etc., ameritan un estudio particular, en función de la cual se selecciona la tensión más adecuada para el diseño (disparo) de los apartarrayos.

El exacto conocimiento del comportamiento del sistema, en caso de fallas a tierra, debido al tratamiento que se le ha dado al neutro del sistema, resulta ser de extremada importancia en la selección de la tensión de diseño del apartarrayos, ya que ella estipula el nivel de protección dado por el mismo.

Conexión entre el neutro del sistema y tierra.

La selección de los apartarrayos para su conexión entre el neutro del sistema y tierra depende del tratamiento que se le haya dispensado al neutro del sistema. Se tienen que diferenciar, por consiguiente, los siguientes casos:

1. Sistemas con instalación a tierra no efectiva del neutro.- Por tales sistemas se entiende al neutro flotante, inductivamente puesto a tierra, y bajo ciertas circunstancias también a la conexión semirrígida a tierra.

La selección de la tensión de disparo se lleva a cabo independientemente del coeficiente de aterramiento. Los valores recomendados más frecuentes en la práctica oscilan entre.

$$U_d = 0.6 \dots \dots \dots 0.8(U_L) \qquad \text{Ec. 6.11}$$

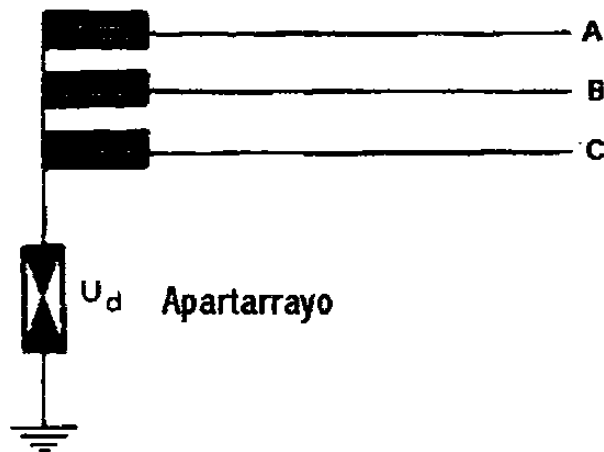
2. Sistemas con instalación efectiva del neutro.- En estos sistemas, con la idea de reducir el nivel de corto circuito, es posible que no todos los

neutros estén conectados a tierra. Si los transformadores de potencia han sido diseñados con aislamiento reducido, particularmente en la conformación del neutro, entonces es recomendable su protección contra incrementos bruscos de tensión.

La selección de la tensión de disparo del apartarrayos se lleva a cabo de acuerdo con la siguiente relación:

$$U_d = I_f Z_0 \quad \text{Ec. 6.12}$$

donde I_f es la intensidad de corriente monopolar de falla a tierra y Z_0 la impedancia de secuencia cero del sistema afectado. En vista de que la tensión debe ser limitada. Se toma como valor de referencia la tensión residual (kV) correspondiente a 1kA de derivación a tierra.



Conexión del apartarrayos al neutro del sistema.

Fig. 6.7

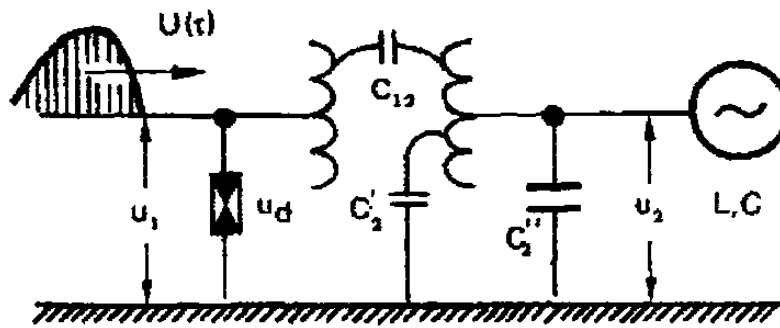
Protección de motores y generadores.

La selección de apartarrayos para la protección de máquinas dinámicas (giratorias) no es sencilla, debido a que la mayoría de tales máquinas denotan un aislamiento bajo. La tensión de disparo del apartarrayos, que al mismo tiempo establece el nivel de protección, tiene entonces que ser baja. Si se tiene conocimiento de que la máquina que debe ser protegida puede verse expuesta a incrementos sustanciales de la tensión de régimen, como consecuencia, por ejemplo, de desconexión de carga, entonces es menester aumentar la tensión de disparo, o, en su defecto exponer al apartarrayos a una sobrecarga, la cual debe ser estimada de antemano. La tensión de disparo se selecciona entonces con la ayuda de la siguiente relación:

$$U_d = U_L \frac{100 + \Delta U}{100} \quad \text{Ec. 6.13}$$

donde U_L es la tensión (fase-fase) de la máquina y ΔU el incremento transitorio de tensión entre ante la desconexión de carga y máxima excitación; este último valor oscila entre 30 y 40%, pero debe ser consultado o ratificado, en todo caso, con el fabricante de la máquina.

Independientemente de la protección seleccionada en el lado de alta, es conveniente entonces escoger adecuadamente los apartarrayos a la entrada de la máquina, ya que las tensiones generadas en el lado de alta pueden ser transferidos al lado de baja, donde se encuentra la máquina, a través del acoplamiento capacitivo e inductivo del transformador. En la figura 6.8 se ilustra una de estas contingencias, cuando una sobretensión $u(t)$ se aproxima al devanado del transformador de potencia.



Protección de un transformador de potencia trifásico (Del-Est), el cual opera en bloque con un generador (las capacitancias son hipotéticas)

Fig. 6.8

Conexiones especiales.

Existe un sin número de conexiones especiales en las cuales se le encomienda al apartarrayos una protección particular. Puede citarse, por ejemplo, la conexión en serie del apartarrayos con la línea, cuando se le utiliza para proteger reenganchadores automáticos (reclosers) y bancos de condensadores en serie. En ambos casos el apartarrayos sirve de puente (bypass) a las sobretensiones que se aproximan a través del conductor. En estos casos la tensión de disparo del dispositivo tiene que obedecer a criterios especiales y no puede ser, en consecuencia, indicada a través de una simple fórmula.

Otras conexiones particulares son las correspondientes a la conexión de tres apartarrayos en Δ , como la señalada en la figura B, para

cortocircuitar las sobretensiones entre fases, ya que ninguno de los pararrayos está conectado a tierra.

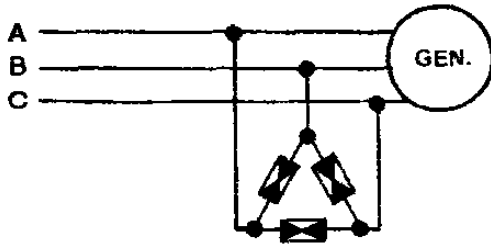


Figura B Protección de un generador contra sobretensiones transmitidas inductivamente. Conexión Δ y entre fases.

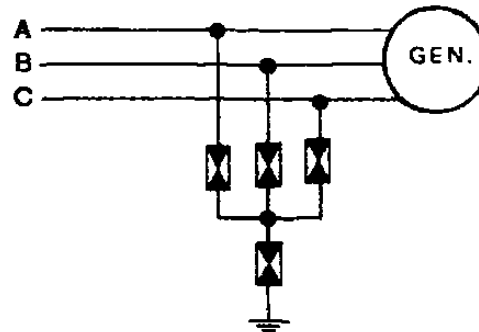


Figura A Pararrayos especial, que combina las funciones de los seis (6) anteriores y de diseño convencional, con un sustancial ahorro de dinero y espacio. Los cuatro pararrayos señalados forman una sola pieza.

Fig. 6.9 (a y b)

6.4.3. Mallas de tierra.

Como ya se ha mencionado con anterioridad la malla o rejilla de tierras es geoméricamente un rectángulo con conductores transversales y en algunos casos varillas o electrodos de tierra que simulan ser el equivalente a una placa de fierro o cobre sólida, que cubre el área de la subestación y que se encuentre enterrada a cierta profundidad con la finalidad de absorber cualquier disturbio o perturbación que de cómo resultado una falla a tierra, proporcionando seguridad para el personal y protección para el equipo así como mantener la continuidad del servicio.

El diagrama de flujo de la figura 6.10 ilustra la secuencia de los pasos para diseñar la rejilla de tierra. Los parámetros mostrados en el diagrama de flujo son identificados en el índice de la tabla 6.11

Tabla No.
Indice de Parámetros

Symbol	Description	Reference Sections
I_0	Symmetrical fault current in substation for conductor sizing in A	9.3, 9.4, 13.2, 13.4
I_G	Maximum grid current that flows between ground grid and surrounding earth (including dc offset) in A	13.4
ρ	Soil resistivity in $\Omega \cdot m$	11
ρ_s	Surface layer resistivity in $\Omega \cdot m$	5.4, 10.5
h_s	Surface layer thickness	5.4
C_p	Current projection factor for future system growth	13.1, 13.10
C_s	Surface layer resistivity derating factor	5.4
t_i	Duration of fault current for sizing ground conductor in s	9.3, 9.4, 9.6
t_f	Duration of fault current for determining decrement factor in s	13.9
t_s	Duration of shock for determining allowable body current in s	3.2-4.3
h	Depth of ground grid conductors in m	12.2, 12.3
d	Diameter of grid conductor in m	9.3, 9.4, 9.6
A	Total area enclosed by ground grid in m^2	12.2, 12.3
D	Spacing between parallel conductors in m	14.4, 14.5
D_f	Decrement factor for determining I_G	13.1, 13.9, 14.2
n	Number of parallel conductors in one direction	14.4, 14.5
K_m	Spacing factor for mesh voltage, simplified method	14.4, 14.5
K_s	Spacing factor for step voltage, simplified method	14.4, 14.5
K_i	Corrected factor for grid geometry, simplified method	14.4, 14.5
K_{ii}	Corrective weighting factor that adjusts the effects of inner conductors on the corner mesh, simplified method	14.5, A
K_h	Corrective weighting factor that emphasizes the effects of grid depth, simplified method	14.5, A
L	Total length of grounding system conductor, including grid and ground rods in m	14.5
R_g	Resistance of ground system in Ω	12.1 - 12.4
E_m	Mesh voltage at the center of the corner mesh for simplified method in V	14.4 - 14.5
E_s	Step voltage between a point above the outer corner of the grid and a point 1 m diagonally outside the grid for simplified method in V	14.4 - 14.5
$E_{touch50}$	Tolerable touch voltage for human with 50 kg body weight in V	6.2, 6.3
$E_{touch70}$	Tolerable touch voltage for human with 70 kg body weight in V	6.2, 6.3
E_{step50}	Tolerable step voltage for human with 50 kg body weight in V	6.2
E_{step70}	Tolerable step voltage for human with 70 kg body weight in V	6.2

Tabla 6.11

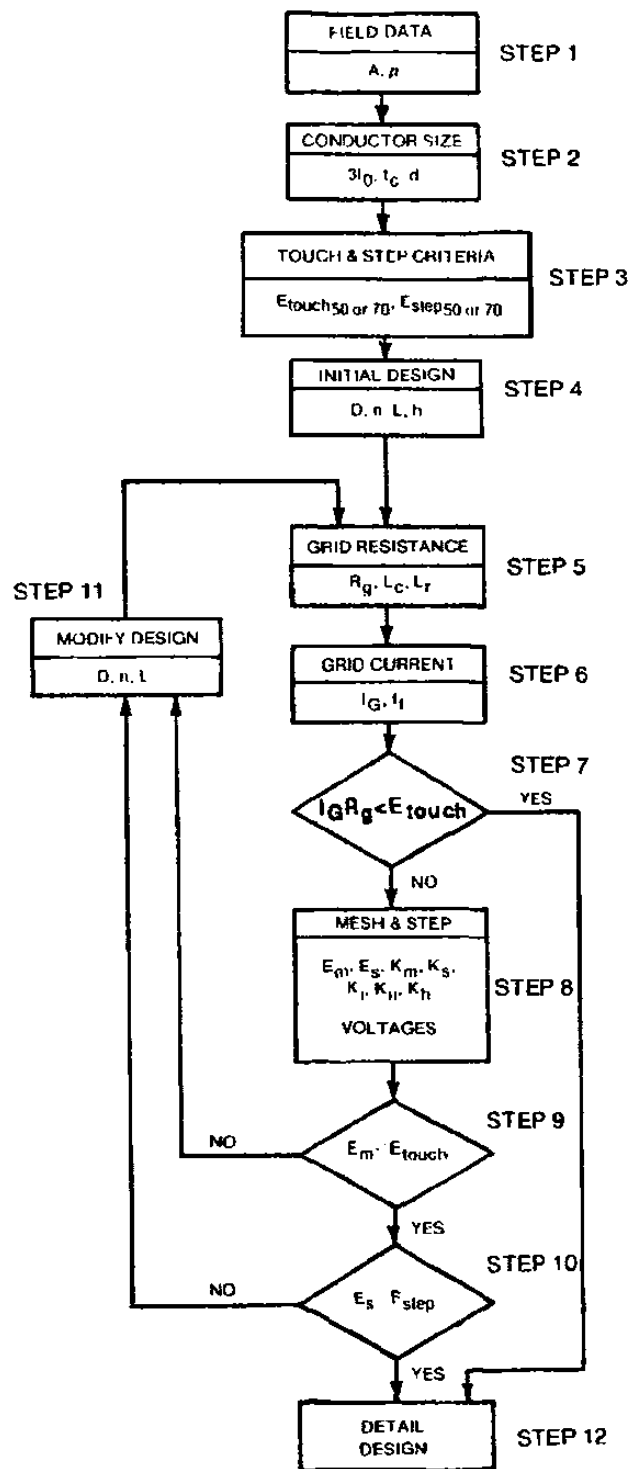


Diagrama de Flujo

Fig. 6.10

En el siguiente párrafo expondremos brevemente los parámetros que serán considerados dentro del proceso de diseño:

(1) Un mapa apropiado y un plano general de la ubicación de la subestación pueden suministrarnos buenos estimados del área que será aterrizada. Una prueba de la resistividad del terreno, determinara el perfil de resistividad del mismo y el modelo de tierra que se necesitará.

(2) El calibre del conductor se determina por la corriente de falla que se ha calculado previamente mediante las ecuaciones la cual es $3I_0$ que es la corriente máxima de falla esperada la que será conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo t_f debió reflejar el máximo tiempo posible de estabilización.

(3) La tolerancia de los potenciales de paso y de contacto, será determinada por las ecuaciones del método utilizado. La elección del tiempo t_c se baso en los criterios de la ingeniería de diseño junto con la guía 3.2-4.3 de la Guía IEEE para la seguridad en tierras de subestaciones de C.A.

(4) El diseño preliminar deberá incluir a un conductor que forma un lazo rodeando totalmente el área aterrizada, más unos conductores cruzados adecuadamente para suministrar un acceso conveniente para la tierra de equipo, etc. El estimado inicial del espaciamiento de conductores, y la ubicación de las varillas de tierra deberán basarse en la corriente de malla (I_g) y el área que será aterrizada.

(5) Los estimados de la resistencia preliminar del sistema de tierra, pueden ser determinado por las ecuaciones dadas en:

Terreno de constitución uniforme:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad \text{Ec. 6.14}$$

Donde:

R_g = Resistencia de tierra de la subestaciones Ω .

ρ = Porcentaje de resistividad de la tierra en Ω -m.

A = El área ocupada por la rejilla de tierra en m^2

Un límite superior de la resistividad de la subestación, puede ser obtenido al agregar un segundo término a la formula, como lo ha propuesto Laurent y Niemann:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad \text{Ec. 6.15}$$

Donde:

L = La longitud total de los conductores enterrados.

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema de tierras consiste de un gran numero de conductores que se asemejan a una sólida placa metálica, y que su diferencia deberá decrecer con el incremento en la longitud de los conductores enterrados, aproximándose a 0 para L igual a infinito, cuando se alcanzan las condiciones de una placa sólida.

Las ecuaciones 6.14 y 6.15 pueden ser usadas con razonable aproximación para profundidades de rajillas menores a 0.25m. Para

rejillas con profundidades entre los 0.25 a 2.5m, es necesaria una corrección por profundidad. Utilizando la aproximación de Sverak's:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad \text{Ec. 6.16}$$

Donde:

h = Profundidad de la rejilla.

Para el diseño final, habrá necesidad de estimar más aproximaciones de la resistencia que será deseada, especialmente cuando son usadas varillas de tierra para enriquecer más la conductividad del suelo.

(6) La corriente de rejilla (I_g) ha sido determinada por las ecuaciones de la sección 13. Con la finalidad de prevenir un burdo sobre diseño del sistema de tierras, solamente una porción de la corriente de falla total $3I_0$, la cual fluye a través de la rejilla hacia una tierra remota, deberá ser usado en el diseño de la rejilla. La corriente de rejilla I_g deberá, como siempre, reflejar el peor tipo de falla y del lugar, el factor de decremento, y cualquier expansión futura del sistema.

(7) Si el GPR del diseño preliminar esta por debajo de la tolerancia del potencial de contacto, entonces no es necesario un análisis más profundo. Solamente se agrega un conducto para el acceso a tierra del equipo.

(8) Los cálculos para los potenciales de paso y de malla para la rejilla como las ya diseñadas, podrán ser hechos mediante técnicas de análisis aproximados, o mediante técnicas de computación con una mayor precisión.

(9) Si el potencial de malla calculado esta por debajo de la tolerancia del potencial de contacto, el diseño se ha completado. Si el potencial de malla calculado es mayor que el potencial de contacto tolerable, el diseño preliminar deberá ser revisado.

(10) Si ambos potenciales, el de contacto y de paso calculados están por debajo de los potenciales tolerados, el diseño necesita de pequeños ajustes para suministrar el acceso a tierra del equipo. Si no, el diseño preliminar debe ser revisado.

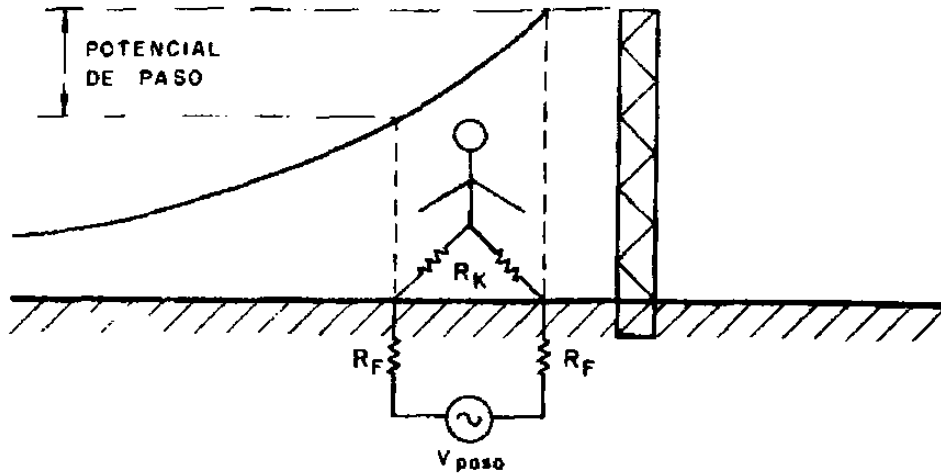
(11) Si todavía los límites de tolerancia de paso y de contacto han sido excedidos, es necesario hacer una revisión del diseño de la rejilla. Esta revisión tal vez deberá incluir el espaciamiento de conductores pequeños, agregar varillas de tierra, etc.

(12) Después de satisfacer los requerimientos de los potenciales de paso y de contacto, podría ser necesario agregar conductores a la rejilla así como varillas de tierra. Los conductores de la rejilla agregados serán necesarios si el diseño de la rejilla no incluye conductores cercanos a los equipos para ser aterrizados. Varillas de tierra extra serán necesarias en la base de pararrayos, neutros de transformadores, etc.

6.5. Procedimientos para medir u obtener:

6.5.1. Potenciales de paso y de contacto.

Al circular a tierra las corrientes de falla, generan gradientes de potencial sobre la superficie del suelo, en zonas cercanas a las mallas de tierra. El potencial que aparece entre los pies de una persona parada sobre el suelo, se le conoce como Potencial de Paso; en tanto que el potencial que existe entre la mano de una persona que esta tocando alguna parte de la estructura del edificio y sus pies, se le conoce como Potencial de Contacto.



POTENCIAL DE PASO

Fig. 6.11

El valor del voltaje de paso tolerable es:

$$V_{paso} = (R_k + 2R_F)I_K \quad \text{Ec. 6.17}$$

donde:

R_F = Resistencia a tierra de un pie. (ohms)

para fines prácticos:

$$R_f = 3\rho S \quad \text{Ec. 6.18}$$

ρS = Resistividad de la capa superficial del suelo. (ohms-m)

R_K = Resistividad del cuerpo, (ohms) \cong 1000 ohms.

I_K = Valor eficaz de la corriente que circula por el cuerpo en amperes.

Y se puede calcular como:

$$I_K = \frac{0.116}{\sqrt{T}} \quad \text{Ec. 6.19}$$

T = Duración de la falla en segs. (T < 3 seg.)

Para fallas sostenidas se toma:

$$I_K = 0.009A.$$

De lo anterior, para fallas con duración menor de 3 seg.

$$V_{paso} = \frac{(1000+6\rho S)0.116}{\sqrt{T}} \quad \text{Ec. 6.20}$$

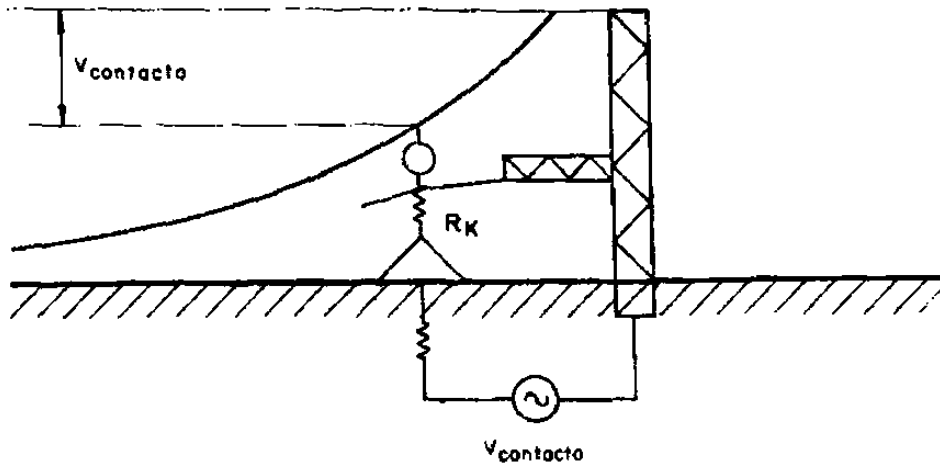
$$V_{paso} = \frac{(116+0.7\rho S)}{\sqrt{T}} \cdot (\text{volts}) \quad \text{Ec. 6.21}$$

Para fallas sostenidas:

$$V_{paso} = (1000 + 6\rho S) \times 0.009 \cdot (\text{volts}) \quad \text{Ec. 6.22}$$

$$V_{paso} = (9 + 0.054\rho S) \cdot (\text{volts}) \quad \text{Ec. 6.23}$$

Para una conexión a tierra segura, para el potencial de contacto, en condiciones de falla: el gradiente de potencial en (volts/m) en la superficie del suelo, no debe exceder a lo calculado en las formulas anteriores.



POTENCIAL DE CONTACTO

Fig. 6.12

De manera semejante el potencial de contacto tolerable, se calcula como:

$$V_{con} = (R_K + \frac{R_F}{2}) I_K \quad \text{Ec. 6.24}$$

Para fallas con duración menor de 3 seg.:

$$V_{con} = \frac{(116 + 0.174 \rho S)}{\sqrt{T}} \cdot (\text{volts}) \quad \text{Ec. 6.25}$$

6.5.2. La elevación máxima del potencial de la malla.

Enseguida se expone la ecuación utilizada para determinar el potencial de malla considerando a esta en forma de cuadro sin varillas de tierra:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L} \quad \text{Ec. 6.26}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_u}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \text{ Ec. 6.27}$$

Donde:

$K_u = 1$ Para rejillas con varillas a lo largo del perímetro, o para rejillas con varillas en las esquinas de la misma, también como en ambos lados a lo largo del perímetro y a través del área de la rejilla.

$$K_u = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \text{ Ec. 6.28}$$

Para rejillas sin varillas de tierra o rejillas solo con algunas varillas de tierra, que no estén localizadas en las esquinas o en el perímetro.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \text{ Ec. 6.29}$$

$h_0 = 1\text{m}$ (profundidad de referencia de la rejilla)

y D , h , n , y d son definidas por la tabla 6.11:

$$K_i = 0.656 + 0.172m \text{ Ec. 6.30}$$

Si L_c representa la longitud total del conductor de la rejilla y L_r representa la longitud total de la varilla de tierra, entonces para rejillas con varillas de tierra.

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_s}{L_c + 1.15L_r} \quad \text{Ec. 6.31}$$

Los voltajes de malla y de paso son obtenidos del producto geométrico de dos factores (K_m y K_s , respectivamente), un factor de corrección, junto con el incremento de la densidad de corriente en los extremos de la rejilla, la resistividad del suelo (ρ), y el porciento de la densidad de corriente por unidad del conductor enterrado (I_G/L).

6.5.3. Potenciales de paso en la periferia de la malla.

Para él calculo del potencial de paso en la periferia de la malla tenemos:

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L} \quad \text{Ec. 6.32}$$

Donde:

$L = L_c + L_r$, para rejillas sin varillas de tierra o con algunas varillas en el centro alejadas del perímetro.

O

$L = L_c + 1.15L_r$, para rejillas con varillas de tierra predominando alrededor del perímetro.

Por simplicidad, el máximo voltaje de paso es considerado cuando este se presenta a una distancia equidistante con la profundidad de la rejilla,

h , por fuera del perímetro del conductor. Para la usual profundidad de enterrado de $0.25 < h < 2.5$ m .

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad \text{Ec. 6.33}$$

y para profundidades menores a 0.25 m.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right] \quad \text{Ec. 6.34}$$

donde

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n-1} \quad \text{Ec. 6.35}$$

o para $n \geq 6$

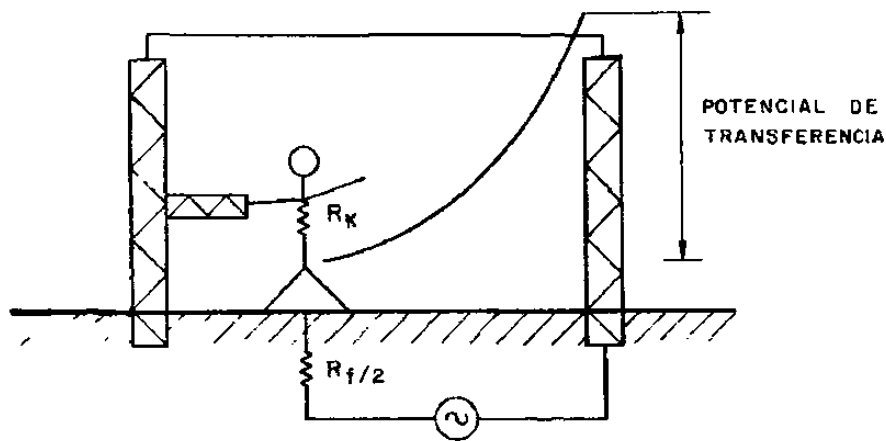
$$W \approx \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423 \quad \text{Ec. 6.36}$$

El uso de diferentes ecuaciones para K_s , depende de la profundidad de la rejilla para el cual el voltaje de paso decrece rápidamente con el incremento de la profundidad.

6.5.4. Los potenciales de transferencia.

Es un caso especial del potencial de contacto en donde el potencial es transmitido desde adentro o de afuera de la subestación.

Si una persona toca un conductor conectado a tierra, a una distancia mucho mayor que las dimensiones del sistema de tierras; el impacto del voltaje, puede ser igual a la elevación total del voltaje del sistema de tierras, bajo condiciones de falla, a este voltaje de contacto, se le llama Potencial de Transferencia.



POTENCIAL DE TRANSFERENCIA

Fig. 6.13

7 ÉL CALCULO.

7.1 Características del suelo.

Se encontró un tipo de tierra homogénea con un bajo grado de humedad el cual presenta una resistencia promedio $\rho = 39.59 \Omega\text{-m}$.

7.2. Máxima corriente a tierra.

$$I_0 = 40KA$$

7.3. Diseño preliminar del sistema de tierras.

Datos:

Resistividad de la capa superficial	$\rho_s = 207.4\Omega - m.$
Resistividad del suelo	$\rho = 39.6\Omega - m.$
Duración de la falla	$t_s = 0.5Seg.$
Voltaje de línea	$V_L = 400KV$
Profundidad de la red de tierras (típica)	$h = 0.5m.$
Área de la subestación	$A = 40 \times 80 = 3200m^2$
Factor de división de corriente	$S_f = 0.6$
Corriente de falla	$I_f = 23094Amps.$
Espaciamiento de los cuadros de la red	$D = 4$

7.4. Resistencia a tierra del sistema.

Considerando un arreglo rectangular sin varillas o electrodos de tierra:

$$L = 80(11) + 40(21) = 1720m.$$

$$R_G = 39.6 \left[\frac{1}{1720} + \frac{1}{\sqrt{20(3200)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{20/3200}} \right) \right] = 0.33\Omega$$

$$I_G = S_f D_f I_f = (0.6)(1.0)(23094) = 13860 \text{ Amps.}$$

$$GPR = I_G R_G = (13860)(0.33) = 4575 \text{ Volts.}$$

7.5. Incremento máximo de potencial en la red. (E_m)

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_u}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$h_0 = 1m. \quad D = 4m. \quad h = 0.5m. \quad d = 0.01m.$$

$$n = \sqrt{FC} = \sqrt{11(21)} = 15.2 \approx 15$$

$$K_u = \frac{1}{(2n)^{2/n}} = \frac{1}{(30)^{2/15}} = 0.635$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.22$$

$$K_m = \frac{1}{6.283} \left[\ln \left(\frac{(4)^2}{16(0.5)0.01} + \frac{(4+2(0.5))^2}{8(4)0.01} - \frac{0.5}{4(0.01)} \right) + \frac{0.635}{1.22} \ln \left(\frac{8}{3.1419[2(15)-1]} \right) \right]$$

$$K_m = 0.686$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n = 0.656 + 0.172(15) = 3.236$$

$$E_m = \frac{(39.6)(0.686)(3.236)(13860)}{1720} = 715.235 \text{ Volts}$$

7.6. Voltaje de paso en la periferia.

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L}$$

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

$$K_s = \frac{1}{3.14195} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{4+0.5} + \frac{1}{4} (1 - 0.5^{15-2}) \right]$$

$$K_s = 0.469$$

$$E_s = \frac{39.6(0.469)(3.236)(13860)}{1720} = 488.88 \text{ Volts}$$

7.7. Voltaje de paso y de contacto tolerables.

$$E_p = \frac{116 + 0.7(207.4)}{\sqrt{0.5}} = 369.364 \text{ Volts}$$

$$E_c = \frac{116 + 0.174(207.4)}{\sqrt{0.5}} = 215.09 \text{ Volts}$$

7.8. Investigación de los voltajes transferidos y puntos peligrosos especiales.

La tarea de investigar los potenciales de transferencia, no será necesaria debido a que en las zonas circundantes a la subestación no se encuentran estructuras, tuberías, redes remotas, rieles etc. Que nos hagan pensar en alguna conexión eléctrica del sistema de tierras de la subestación

y objetos que nos hagan pensar en una transferencia de potencial a distancia.

7.9. Corrección o refinamiento del diseño indicado en los puntos 7.6, 7.7 y 7.8.

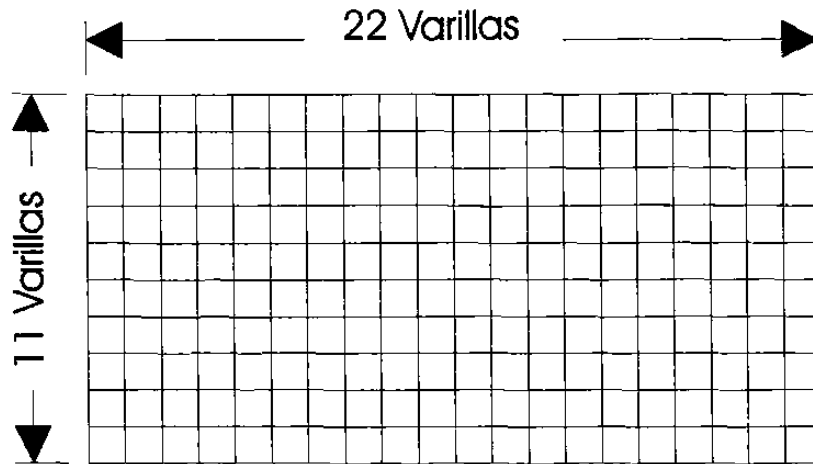
Como el potencial de malla sigue siendo superior al de paso, entonces se tiene que agregar más longitud al conductor de la malla; esto se puede resolver, agregando más alambre de cobre o en su defecto con varillas de tierra. El incremento en longitud se puede establecer mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \left(\frac{E_m}{E_p} - 1 \right) L = \left(\frac{715.235}{369.364} - 1 \right) (1720) = 1611m$$

7.10. Construcción del sistema de tierras.

Arreglo preliminar.

Aun que no es necesario que la malla de tierra tenga las mismas dimensiones o el área de la subestación, esta puede ser mayor, la única condición que se debe de cumplir es el de tener potenciales de malla que se encuentren dentro de los criterios de seguridad (potenciales de paso o de contacto). Por lo tanto el arreglo que se propone es el que se muestra en la figura 7.1.



Arreglo rectangular con conductores de cobre con espaciamientos de 4m. sin varillas de tierra.

Fig. 7.1

7.11. Revisión de acuerdo a las medidas de los puntos 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8.

De acuerdo con los índices establecidos, el calculo preliminar nos indica que hay que hacer un ajuste o corrección agregando una cantidad adicional de cable de cobre desnudo, sin embargo también se pudo constatar que aparte del cable es necesario agregar un cierto número de varillas o electrodos de tierra.

7.12. Modificación del sistema mediante el agregado de cable y varillas según el resultado obtenido en el punto 7.11.

Como cada varilla tiene una medida estándar de 3.05m. (10ft.) podemos obtener el número de varillas necesarias para compensar el incremento de longitud que necesitamos para que el potencial de malla

quede dentro o por debajo de los potenciales tolerables, por la siguiente relación: $L_{VT} = 3.05m$.

$$N_{VAR} = \frac{\Delta L}{L_{VT}} = \frac{1611}{3.05} = 528.2 \approx 528 \text{ Varillas}$$

Por lo tanto la nueva longitud que tendremos agregando electrodos de tierra para completar el total del conductor que será necesario utilizar es:

$$L_n = L_{cond} + L_{var}$$

Si mantenemos la rejilla con el mismo número de divisiones no contamos con los vértices necesarios para colocar las varillas que deberán ser utilizadas para normalizar los voltajes, habrá necesidad de incrementar el número de cuadros o divisiones acrecentando también la cantidad de conductor necesario para este arreglo.

$$L_n = 3320 + 1830 = 5150m$$

Calculando de nuevo obtenemos:

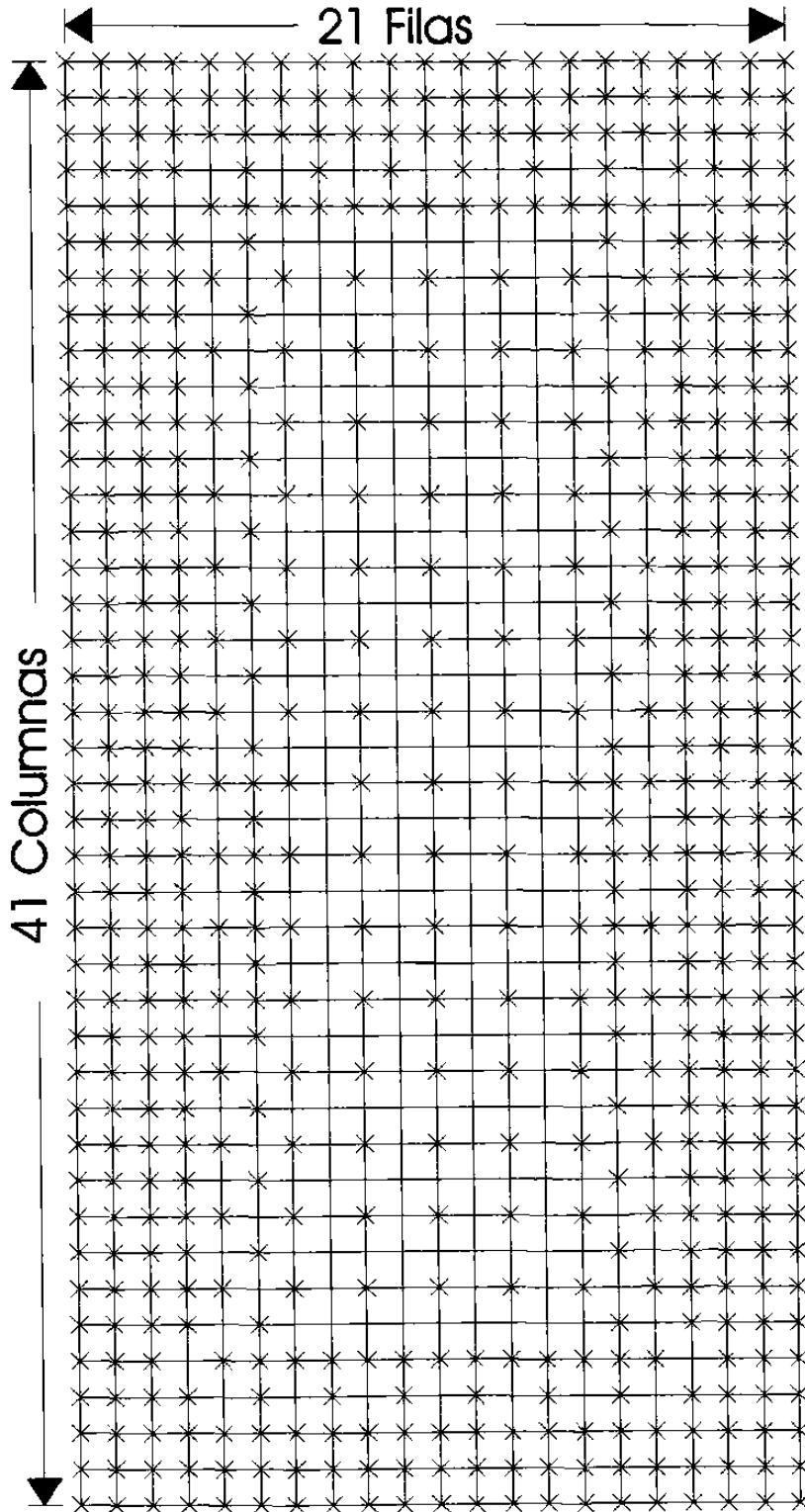
$$R_G = 0.315\Omega$$

$$D = 2m$$

$$E_m = 252.446Volts$$

$$E_s = 367.488Volts$$

Que al compararlos con los potenciales de contacto y de paso tolerables observamos que estos nuevos valores quedan dentro del rango establecido, por lo que ya no existe la necesidad de hacer un nuevo ajuste o depuración del calculo.



Arreglo de rejilla rectangular con espaciamiento de 2m. y con varillas o electrodos de tierra

7.2
Arreglo Final

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1. Conclusiones.

El arreglo de la malla de tierras que ha sido diseñada, es uno de los componentes básicos del sistema de protección, y que en base a los resultados obtenidos, nos indican claramente que se cumple con las normas y reglamentos indicados, siendo funcional y eficiente, en un alto grado como para afrontar la mayoría de las perturbaciones (sobre tensiones) que se presenten en ella, asegurando también el correcto drenado del flujo de corriente de falla a tierra, quedando los potenciales peligrosos de la subestación dentro de los límites de tolerancia permitidos, asegurando una protección cabal al personal que labora, asegurando al equipo de no sufrir algún daño, manteniendo el funcionamiento continuo de esta.

BIBLIOGRAFÍA

Donald Beeman

Industrial Power Systems Handbook

McGraw-Hill

1955

Enriquez Harper

El ABC de las Instalaciones Eléctricas Industriales

LIMUSA

1997

Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Guía del IEEE para la Seguridad en Tierras de Subestaciones de C.A.

IEEE

1986

Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial

Power Systems

IEEE

1982

Luis A. Siegert C.

Alta Tensión y Sistemas de Transmisión

Limusa

1988

LISTADO DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
6.1	Materiales utilizados en la capa superficial del suelo	61
6.2	Radios de protección para pararrayos de un fabricante	64
6.3	Materiales Clase I	66
6.4	Materiales Clase II	66
6.5	Valores típicos de índice de riesgo	69
6.6	Tipo de Estructuras	70
6.7	Tipo de Construcción	71
6.8	Arreglo del Edificio	71
6.9	Topografía	72
6.10	Uso del Local o Edificio	72
6.11	Frecuencia de los rayos	72
6.12	Parámetros del cálculo	82

LISTADO DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pagina
	CAPITULO 2	8
2.1	Distribución de cargas eléctricas en una nube	8
2.2	Distribución de cargas eléctricas según Teoría de Simpson	10
2.3	Nube con cargas eléctricas No Homogéneas	12
2.4	Formación del Canal Plasmático (Inicio)	13
2.5	Formación Total del Canal Plasmático	13
2.6	Contacto entre diferentes niveles de potencial (Mayor)	16
2.7	Circuito Resistivo, Inductivo, y Capacitivo	17
2.8	Diagrama Vectorial de un Circuito Resonante	19
2.9	Falla a tierra de un circuito sin neutro a tierra	21
	CAPITULO 3	23
3.1	Explosor de Puntas	23
3.2	Sistema de Protección contra Rayos	24
3.3	Radio de Protección según la altura de montaje del pararrayos	25
3.4	Explosor de Puntas con Resistencia	27
3.5	Apertarrayos Tipo Autoválvula para Bajo Voltaje	28
3.6	Esquema de un Apartarrayos Tipo Autoválvula	29
3.7	Arreglo Típico de una Malla de Tierras	31
3.8	Elementos Principales de una Puesta a Tierra	32
3.9	Ciclo de conexión y desconexión de un Interruptor	35

CAPITULO 5	47
5.1 Disposición del Equipo de la Subestación	47
5.2 Ubicación de la Subestación	48
5.3 Puntas de Pararrayos Tipo Alfiler	49
CAPÍTULO 6	59
6.1 Método Wernner	59
6.2 Método de los Tres Puntos	60
6.3 Cono de Protección de un Pararrayos	63
6.4 Esquema Simplificado de Protección con Pararrayos	65
6.5 Índice por Regiones de la Frecuencia de Rayos	73
6.6 Conexión de Apartarrayos a Tierra	74
6.7 Conexión de Apartarrayos al Neutro del Sistema	78
6.8 Protección a Transformadores en Bloque con Generadores	80
6.9 Conexiones Especiales de Apartarrayos	81
6.10 Diagrama de Flujo del Cálculo de una Malla de Tierras	83
6.11 Potenciales de Paso	88
6.12 Potenciales de Contacto	90
6.13 Potenciales de Transferencia	94
CAPITULO 7	99
7.1 Arreglo Preliminar de la Malla de Tierras	99
7.2 Arreglo Final	100

AUTOBIOGRAFÍA

Mi nombre es Ing. Hilario García González, nací el 14 de Enero de 1953, en la ciudad de Monterrey capital del estado de Nuevo León. Mis padres son el Sr. Hilario García González (finado) y la Sra. Rebeca González Viuda de García, la primaria y parte de la secundaria la realice en el colegio Instituto Regiomontano, la secundaria la termine en la escuela Secundaria No.6 Centenario de la Constitución, la prepar en la Preparatoria No.2 de la Universidad Autónoma de Nuevo León, la licenciatura la curse en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la misma universidad antes mencionada, donde obtuve el título de Ingeniero Mecánico Electricista en 1975. Mi experiencia profesional sé a desarrollado por una parte por mi cuenta haciendo instalaciones eléctricas residenciales y comerciales en baja tensión, desarrolle ingeniería de calculo en el Bufete de Ingeniería Industrial S.A. (BIISA). Actualmente me desempeño como catedrático de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U.A.N.L. con una antigüedad de 27 años.

