

123  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

*ESTUDIO SOBRETENSIONES DE ORIGEN  
INTERNO Y EXTERNO EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCION DE ENERGIA ELECTRICA*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

RAUL SANCHEZ LOZANO

DIRECTOR: ING. J. VICENTE LEDUC RUBIO

MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1991



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE TEMATICO

### CAPITULO 1: SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO.

Generalidades.

2

### CAPITULO 2: SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO.

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.1     | Introducción  | 10 |
| 2.2     | Sobretensiones de baja frecuencia debidas a desequilibrios en las redes.  | 10 |
| 2.3     | Desequilibrios de alta frecuencia debidos a la operación de interruptores.  | 13 |
| 2.4     | Resonancia.   | 15 |
| 2.5     | Ferroresonancia.  | 19 |
| 2.5.1   | Cálculo de capacitancia.  | 21 |
| 2.5.1.1 | Cálculo de capacitancia para cable monopolar con cubierta o pantalla metálica.  | 22 |
| 2.5.1.2 | Cálculo de capacitancia para cable tripolar con cubierta común.   | 22 |
| 2.5.2   | Operación monofásica de fusibles.   | 24 |
| 2.6     | Protección contra sobretensiones internas.  | 25 |
| 2.7     | Fluctuaciones transitorias de tensión en sistemas de distribución provocadas por la operación de hornos eléctricos de arco. |    |
| 2.8     | Conclusiones.   | 38 |

### CAPITULO 3: SOBRETENSIONES DE ORIGEN EXTERNO.

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1   | Introducción   | 42 |
| 3.2   | Naturaleza de la descarga atmosférica.   | 43 |
| 3.2.1 | Parámetros de la descarga atmosférica.   | 48 |
| 3.2.2 | Número de rayos que terminan en la línea.                                      | 48 |
| 3.3   | Origen de las sobretensiones producidas por Descargas atmosféricas.            | 51 |
| 3.3.1 | Por inducción electrostática.  | 51 |
| 3.3.2 | Por descarga directa en la línea.  | 52 |
| 3.4   | Efectos de las descargas atmosféricas.   | 52 |
| 3.4.1 | Descarga directa al circuito de distribución primario.                         | 54 |
| 3.4.2 | Descarga directa al circuito de distribución secundario.                       | 55 |
| 3.4.3 | Descargas lejanas del rayo sobre la línea.                                     | 55 |
| 3.5   | Efecto de la descarga atmosférica en los sistemas de distribución subterránea. | 56 |

### CAPITULO 4: APARTARRAYOS, HILO DE GUARDA Y REDES DE TIERRA.

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 4.1     | Apartarrayos.  | 60 |
| 4.1.1   | Apartarrayos autovalvulares.                         | 61 |
| 4.1.1.1 | Funcionamiento de los apartarrayos autovalvulares.   | 62 |
| 4.1.2   | Apartarrayos de Oxido de Zinc.                       | 63 |
| 4.1.3   | Cuerno descargador de arco y limitador de corriente. | 66 |
| 4.1.4   | Consideraciones acerca de los tipos de apartarrayos. | 69 |
| 4.1.5   | Clasificación de los apartarrayos.                   | 77 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.1.6   | Coordinación de aislamiento.   | 78  |
| 4.1.6.1 | Nivel básico de aislamiento en sistemas de distribución.                     | 79  |
| 4.1.6.2 | Clasificación de los sistemas eléctricos.                                    | 81  |
| 4.1.7   | Método de selección de apartarrayos.   | 84  |
| 4.1.7.1 | Esquema de protección para transformadores de distribución en líneas aéreas. | 86  |
| 4.1.7.2 | Protección para circuitos de distribución subterránea.                       | 87  |
| 4.2     | Hilo de guarda.  | 91  |
| 4.3     | Redes de tierra.   | 93  |
| 4.3.1   | Conexión a tierra de sistemas eléctricos.                                    | 93  |
| 4.3.2   | Límites tolerables por el cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica.   | 97  |
| 4.3.3   | Tipos de sistemas de tierra.   | 101 |
| 4.3.4   | Resistividad del terreno.  | 102 |
| 4.3.4.1 | Medición de la resistividad.   | 104 |
| 4.3.4.2 | Medición de la resistencia a tierra.   | 108 |
| 4.3.5   | Tipos de electrodos.   | 109 |
| 4.3.5.1 | Electrodos profundos.  | 110 |
| 4.3.5.2 | Electrodos múltiples.  | 111 |
| 4.3.5.3 | Electrodos químicos.   | 113 |
|         | 4.3.5.3.a Agregado de sales simples.   | 113 |
|         | 4.3.5.3.b Agregado de coke.  | 113 |
|         | 4.3.5.3.c Agregado de bentonita.   | 114 |
| 4.3.5.4 | Electrodos horizontales.   | 114 |
| 4.3.6   | Conclusiones.  | 116 |

## CAPITULO 5; CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.1     | Introduccion.   | 118 |
| 5.2     | Investigaciones en modelos analogicos.                | 118 |
| 5.3     | Investigaciones en instalaciones de circuitos reales. | 122 |
| 5.3.1   | Experiencia en Japon.                                 | 122 |
| 5.3.2   | Experiencia en los Estados Unidos.                    | 129 |
| 5.3.2.1 | Experiencia de la Florida Power & Ligth Co.           | 129 |
| 5.3.2.2 | Experiencia de la Long Island Lighting Co.            | 134 |

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**

Con el desarrollo que ha dado el uso de la energía eléctrica, a principios del presente siglo fué necesario la generación de cantidades considerables de dicha energía, apareciendo con esto grandes sistemas eléctricos de potencia comprendiendo centrales generadoras, sistemas de transmisión y de distribución.

Para poder dar el uso eficiente de ésta energía se requiere de todo un conjunto de instalaciones, cada una con funciones específicas, pero con un solo propósito; abastecer a el usuario de la manera más eficiente la energía eléctrica requerida.

La generación y distribución de la energía eléctrica tiene un elevado costo y aunado a que se desea un abastecimiento sin perturbaciones para los usuarios, los sistemas eléctricos de potencia deben de contar con una serie de sistemas de protección que mantengan sin interrupción el abastecimiento de la energía.

Se debe de considerar que la amenaza más grande a la continuidad del suministro de la energía la constituyen las sobretensiones que originan grandes corrientes de falla capaces de activar los sistemas de protección, puesto que su ocurrencia implica un cambio súbito en la operación y estabilidad del sistema, éste flujo incontrolado de energía tiene consecuencias destructivas, causando daños considerables a las instalaciones y equipos que forman un sistema de distribución.

Son precisamente los sistemas de protección los encargados de aislar o limitar la falla, mediante la acción de una serie de equipos de diseñados para tales propósitos. Con "sistemas de protección " nos referimos a todo un conjunto de equipos empleados para detectar, aislar o limitar la falla o bien, controlar una condición anormal dentro del sistema eléctrico.

Por otro lado, la estadística es de mucha utilidad, ya que nos permite orientar los recursos sobre las causas más repetitivas que provocan fallas en los circuitos de distribución, así como dictar las políticas de cómo realizar ciertas actividades.

En base a los datos que aporta la Comisión Federal de Electricidad, se dan a conocer las 10 causas más frecuentes de interrupciones propias al circuito que se registraron en la División Centro Sur de la C.F.E. en los últimos tres años de acuerdo a la incidencia, estas son:

| CAUSAS DE INTERUPCION<br>PROPIAS DEL CIRCUITO | NUMERO DE<br>INTERRUPCIONES | %  |
|---|-----------------------------|----|
| Descarga atmosférica                          | 1398                        | 28 |
| Ramas y/o árbol                               | 785                         | 16 |
| Objetos extraños                              | 710                         | 15 |
| Vientos                                       | 558                         | 11 |
| Vandalismo                                    | 394                         | 8  |
| Tormenta                                      | 335                         | 7  |
| Choque o golpe                                | 273                         | 6  |
| Contaminación                                 | 166                         | 4  |
| Animales                                      | 124                         | 3  |
| operación anormal del equipo                  | 110                         | 2  |

De la estadística anterior se observa que la descargas atmosféricas representan el 28% del total de interrupciones. Es por esta razón que el presente trabajo se enfocará en general al estudio de las sobretensiones en los sistemas de distribución y los diferentes medios y estrategias de protección que se emplean para aumentar la confiabilidad de los sistemas encargados del suministro de energía eléctrica.

Las sobretensiones se pueden clasificar según su origen en internas o externas.

- Sobretensiones de origen interno.

Dentro de las sobretensiones de origen interno se tienen las siguientes:

a) Sobretensiones temporales. Son debidas a desequilibrios en la red con la característica particular de contener con una baja frecuencia y cuyo tiempo de duración es relativamente largo.

b) Sobretensión por maniobra. Este tipo de sobretensión es clasificada como de alta frecuencia y cuyo origen se debe a la apertura y/o cierre de interruptores o equipos de desconexión.

- Sobretensiones de origen externo.

Se pueden subclasificar las sobretensiones de origen externo de la siguiente manera:

a) Sobretensión debida a descargas atmosféricas. El fenómeno de las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, ha sido motivo de análisis teórico y experimental por varios años. El interés desde el punto de vista del efecto que causan se orienta hacia la simulación de las ondas de sobretensiones por rayo y los efectos que provocan en los diferentes equipos eléctricos, y son llevados a cabo en laboratorios de alta tensión.

b) Sobretensiones debidas a siniestros. Se trata por ende de sobretensiones que se pueden producir de forma aleatoria y sin predicción alguna.

Algunos ejemplos específicos de fenómenos que producen sobretensiones en los sistemas de distribución de energía eléctrica son los que a continuación se presentan:

a) Por descargas atmosféricas.

Se presentan generalmente durante días de tormenta, asociando diferentes características como son la corriente del rayo y la forma de onda; la amplitud de la tensión inicial de estas sobretensiones es muy alta, y puede ser originada por descargas directas o inducidas, viéndose limitada por el nivel de aislamiento de la línea al flamear los aisladores; la distancia a la que una onda de sobretensión puede causar daños depende de las características de la línea en la que incide, habiéndose encontrado equipos dañados entre 3 y 4 Kilómetros del punto de incidencia de la descarga.

b) Por maniobra de interruptores.

Al ocurrir las maniobras de apertura o cierre de interruptores, se conectan o desconectan líneas o equipos con cargas inductivas o capacitivas y que provocan sobretensiones en los sistemas, las cuales no deberán ser mayores a 2.5 veces el valor de cresta de la tensión nominal de fase a neutro del mismo y tardan algunos ciclos en disiparse completamente.

c) Por fallas monofásicas a tierra.

Al ocurrir una falla de fase a tierra, la tensión en las fases que no se dañaron se eleva, manteniendo la frecuencia del sistema, dependiendo de los parámetros de la propia línea y del tipo de sistema de que se trate.

d) Por ferresonancia.

Este fenómeno puede presentarse en transformadores de distribución trifásicos o en bancos de transformadores monofásicos si son conectados al sistema una fase a la vez, ya que la capacitancia a tierra de la línea formará un circuito serie con la impedancia no lineal de los

devanados del transformador, de tal manera que podrían anularse mutuamente y permitir fluir la corrientes de falla a tierra.

Al circular estas corrientes por los circuitos primarios inducirán sobretensiones en los secundarios, con forma de onda irregular y en el caso de dos fases energizadas posiblemente provocarían inversión de las secuencias de fases. Son los sistemas subterráneos los que presentan una probabilidad mayor de ocurrencia de este fenómeno, ya que la capacitancia a tierra de los cables es de valor mayor que en el caso de las líneas aéreas.

Las descargas atmosféricas que afectan principalmente a los sistemas eléctricos son las que producen entre nube y tierra. La forma de como se desarrolla la descarga involucra la formación de un canal ionizado que se origina en la base de una nube cargada (carga negativa en la base y carga positiva en la parte superior en un 90 % de los casos) y se propaga hacia tierra en forma de una guía escalonada. La carga de la base de la nube se deposita al rededor del canal ionizado en forma de una envolvente corona de varios metros de diámetro. Cuando la guía escalonada se aproxima a tierra se inicia la formación de guías ascendentes sobre la superficie de la tierra. Una de las guías ascendentes interceptará la guía descendente. En este punto se produce un pulso de corriente ( corriente de rompimiento) de aproximadamente 2-3 KA de amplitud máxima que viaja en dirección ascendente hacia la base de la nube aproximadamente un tercio de la velocidad de la luz. La carga negativa almacenada al rededor del canal inicia su descenso a tierra desplazándose a la velocidad de la luz conforme el canal es atravesado por la corriente de rompimiento.

El valor medio de la amplitud máxima de la corriente producida por el flujo de carga hacia tierra varía aparentemente dependiendo de la latitud, incrementándose en la dirección hacia el ecuador. El rango de valores reportados en diferentes estudios fluctúa entre 18 y 40 KA.

Después de la primera descarga de nube a tierra es posible que se produzcan otras descargas utilizando el mismo canal si se llega a depositar una cantidad de carga suficientemente grande en el extremo superior del canal. Esto generalmente ocurre y puede repetirse sucesivamente por varias ocasiones con intervalos de 30-50 milisegundos. El valor medio de la ocurrencia repetitiva de este fenómeno, llamado multiplicidad de la descarga, es de alrededor de tres en la mayoría de los casos, con un máximo de 25, todo con un tiempo alrededor de 1.5 segundos.

La forma de onda típica de la corriente de las descargas a tierra es comúnmente representada por una doble exponencial con frente de onda de 2-4 microsegundos y tiempos de reducción al 50 % de su valor máximo de varias decenas de microsegundos.

Las líneas de distribución en México se encuentran expuestas a altos niveles de descargas atmosféricas, particularmente en la parte central y sureste del país y en algunas regiones aisladas del norte. El índice de fallas promedio en circuitos de distribución de 13 a 33.5 KV atribuidas a rayos es de alrededor de 40 salidas/100 Km/año. En relación al daño a equipo atribuido a descargas atmosféricas, pueden mencionarse que en México se tienen índices de fallas a transformadores de distribución alrededor de 3.2 % (media nacional) con los valores de 5.3.% en regiones con alta densidad de rayos a tierra y suelos de alta resistividad. Los tiempos de interrupción al usuario generalmente se incrementan en zonas con alta incidencia de descargas a tierra.

Los índices de falla arriba reportados son de particular significancia en líneas de distribución. Estos pueden reflejar prácticas de protección inapropiadas o inexistentes. Sin embargo una razón por la que estos índices son tan elevados comparados a los de las líneas de transmisión es la vulnerabilidad de las líneas de distribución a la influencia de las descargas que terminan en la cercanía de las líneas, es

decir, a las tensiones inducidas. Estos ocurren con una frecuencia mucho mayor que las descargas directas.

La influencia que las descargas atmosféricas cercanas o directas a las líneas pueden tener en la degradación del aislamiento de transformadores, regulares, etc., en sus características operativas o envejecimiento prematuro de listones fusibles, apartarrayos, etc., no se ha estudiado con la profundidad necesaria, por lo que se requiere de esfuerzos tendientes a lograr un entendimiento más claro de estos procesos. La forma de conectar los elementos apartarrayos -cortacircuito - transformador debe analizarse cuidadosamente para tratar de reducir los efectos de sobre-esfuerzos producidos por ejemplo por las descargas atmosféricas de elevada multiplicidad, dado que el intervalo tan corto que existe entre cada una de las descargas sucesivas.

La protección contra sobretensiones en los sistemas de potencia ha evolucionado de tal grado, que se ha logrado abatir el índice de salidas en las líneas de distribución en el país. Sin embargo, en las redes de distribución, aún no existen métodos adecuados ni la experiencia suficiente para lograr un control eficaz de este problema. Como alternativa necesaria, se tiene la necesidad de evaluar la aplicación de los diversos esquemas de protección disponibles, así como un mejor conocimiento de la respuesta en estado transitorio de los sistemas de conexión a tierra.

El presente estudio en su capítulo 4 menciona los dispositivos y métodos de protección usados en la actualidad describiendo el funcionamiento, la aplicación, las ventajas y desventajas que se refieran a cada caso.

# **CAPITULO 2**

## **SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO**

**2.1 INTRODUCCION.**

En los sistemas eléctricos se producen tres tipos básicos de sobretensiones, estos se pueden agrupar de la siguiente manera :

- 1.-Sobretensiones temporales de baja frecuencia debidos a desequilibrios en la red.
- 2.-Sobretensiones transitorios de alta frecuencia debidas a la operación de interruptores.
- 3.-sobretensiones transitorios debidos a descargas eléctricas atmosféricas.

Los dos primeros grupos de sobretensiones son causados por fenómenos que tienen su origen en el sistema mismo y pueden agruparse como sobretensiones de origen interno.

El tercer grupo tiene su origen en fenómenos exteriores al sistema eléctrico y se puede casificar como sobretensiones de origen externos.

**2.2 SOBRETENSIONES DE BAJA FRECUENCIA DEBIDOS A DESEQUILIBRIOS EN LAS REDES.**

Se trata de sobretensiones temporales, a la frecuencia fundamental del sistema, debidos a fallas monofásicas ó trifásicas a tierra ó a la apertura de una o dos fases. Estos sobretensiones persistirán mientras no se hagan desaparecer las condiciones de desequilibrio que las han producido.

Las causas de este tipo de sobretensiones son: arcos a tierra que se forman entre uno de los conductores de una línea de distribución, aislada o incompletamente puesta a tierra, un objeto cercano a la línea ,que puede ser una rama de árbol ,una ave posada sobre la cruzeta , una cometa que se incrusto sobre la línea, etc. La intensidad de la corriente pude ser bastante alta , calculndose a razón de 3 miliampers por cada

kilómetro y por cada kilovolt entre hilos, para líneas aéreas de tipo usual: 45 veces más para cables monofásicos y 24 veces más para cables trifásicos. Una línea aérea de 30 Km y 23 Kv y con una frecuencia de 60 ciclos puede dar, un arco 2.07 amperes, y un cable monopolar de 25 Km y 23 Kv puede sostener un arco de 77.625 amperes contra tierra a pesar de no existir, en apariencia, circuito cerrado que lo explique, ya que supuestamente la línea de distribución esta completamente aislada.

Cuando el sistema tiene el neutro conectado a tierra, directamente o por medio de una resistencia de valor bajo, al iniciarse el arco en uno de los hilos, se establece un circuito de baja impedancia que comprende una fase, un hilo, dos tierras y la resistencia al neutro, en su caso. Entonces, o es un corto circuito entre fase y neutro, o es una falla de aislamiento de baja resistencia, pero de cualquier modo la intensidad de la corriente que sigue ese camino es demasiado grande y obliga a que la línea sea desconectada. Es evidente que así no puede subsistir el arco, pero también es evidente que se interrumpe el servicio en la línea afectada. Si la resistencia al neutro es elevada y el circuito no contiene suficiente reactancia inductiva fuera del transformador para compensar la reactancia capacitiva C, el arco podrá existir sin que la línea sea desconectada por sobre corriente, sin embargo, la corriente en el arco será en mayor parte capacitiva y se presentará la oscilación de baja frecuencia y las ondas de sobretensión al establecerse y al extinguirse el arco, son similares a las que se producen estando el sistema totalmente aislado.

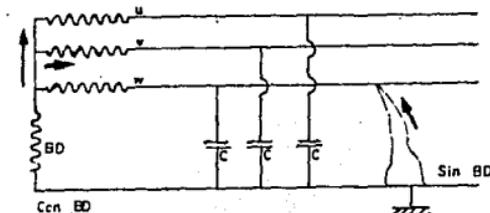


Figura 2.1. -Corrientes de arco a tierra.

En consecuencia hay dos técnicas diferentes para disminuir los efectos de arcos a tierra:

a) El empleo de bobinas de extinción que tan frecuentemente se usa en Europa y que generalmente no obliga a desconectar la línea, aunque exige un cambio importante en las condiciones del sistema.

b) La conexión semidirecta del neutro a tierra, tan conocida en América y que provoca la extinción del arco mejorando la continuidad del servicio en la línea.

El empleo de reactores improvisados para conectar el neutro de un sistema a tierra es sumamente peligroso y puede ocasionar sobretensiones aún más altas que las provocadas por el propio arco a tierra en el sistema aislado, al entrar en resonancia inmediata.

La magnitud de las tensiones de frecuencia fundamental dependen del tipo de falla. Los cortocircuitos monofásicos a tierra y bifásicos a tierra producen sobretensiones en las fases que no han fallado, en cambio los cortocircuitos trifásicos y bifásicos no producen sobretensiones a tierra en otra fase. Además las sobretensiones debidos a cortocircuito bifásico a tierra producen sobretensiones generalmente de menor magnitud que los cortocircuitos monofásicos a tierra, en caso de un cortocircuito monofásico a tierra las tensiones a tierra de las dos fases que no han fallado pueden expresarse en función de sus impedancias de secuencia positiva, negativa y cero del sistema visto desde el punto de falla.

La apertura de una o dos fases, en su mayoría debida a la operación de fusibles pueden generalmente causar sobretensiones de frecuencia fundamental, cuando la inductancia y capacitancia del circuito tengan valores tales que se pueda producir una condición de resonancia, este fenómeno se estudiará más ampliamente en el caso de resonancia causada por fallas de maniobra de interruptores.

### 2.3 SOBRETENSIONES DE ALTA FRECUENCIA DEBIDAS A LA OPERACION DE INTERRUPTORES.

El interruptor es un dispositivo destinado a suspender o establecer la continuidad en un circuito eléctrico bajo carga.

La corriente que puede interrumpir este dispositivo puede ser la corriente normal del circuito, una corriente que puede ser mucho mayor debida a una situación anormal producida por un corto circuito o una corriente mucho menor que la normal, por ejemplo, al desconectar una línea de distribución o un transformador sin carga.

Un interruptor ideal sería aquél en el que sus contactos se separaran en el mismo instante en que la corriente pasa por cero, y por consecuencia no se produciría arco eléctrico.

En realidad los contactos del interruptor pueden empezar a separarse cuando la corriente tiene un valor cualquiera, formándose entre los contactos un arco eléctrico que mantiene la continuidad del circuito, y el cual se extingue al pasar la onda de corriente por valor instantáneo de cero.

Este arco está constituido por gas ionizado a temperaturas muy altas y consiste por lo tanto en electrones libres, desprendidos de los átomos que tienen carga negativa y en átomos que han perdido algunos electrones y que tienen carga positiva.

Los electrones libres contribuyen a la circulación de la corriente en el arco y mantienen el mecanismo de ionización. Los iones positivos contribuyen también a la circulación de corriente, pero en menor grado que los electrones, ya que la movilidad de estos es muy superior por ser su masa considerablemente menor que la de los iones positivos.

El arco es un conductor gaseoso, la caída de potencial a través del arco varía en proporción inversa a la intensidad de corriente.

En el caso de la corriente alterna podemos decir que ésta presenta una gran ventaja sobre la corriente continua, ya que el valor de la onda de corriente pasa por cero 120 veces por segundo para una frecuencia de 60 ciclos. Esta característica se aprovecha para la interrupción de la corriente.

## SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO

En las sobretensiones causadas por maniobra de interruptores se generan oscilaciones de alta frecuencia (de 400 a 3000 ciclos por segundo) que se amortiguan en un tiempo del orden de mil microsegundos.

La amplitud de las oscilaciones dependen, entre otros factores, de la tensión de operación del sistema. En los casos más desfavorables se encuentran por ejemplo desconexión de transformadores o líneas de distribución largas, la amplitud de las oscilaciones transitorias pueden alcanzar valores del orden de tres veces y media del tensión normal de operación si no se toman las medidas necesarias para limitarla. El procedimiento más eficaz para limitar la amplitud de estos sobretensiones a valores de dos a dos y media veces la tensión de operaciones la inserción de resistencias, incorporadas a los interruptores durante la operación de apertura y cierre.

Las sobretensiones más elevadas se producen al efectuar la apertura de líneas largas o cables de potencia en vacío, apertura de corriente de excitación de transformadores ó reactores, y sobre todo, cuando se efectuan recierres en las líneas que pueden haber quedado cargadas a una tensión elevada, al producirse la conexión inicial, los elementos usados para disminuir la sobretensión producida por maniobra van de acuerdo con el tipo y diseño de cada interruptor.

Otras causas de los sobrevoltajes de origen interno son:

a) Las ondas de sobretension producidas por la interrupción del circuito o desconexión de carga, que consisten en la suspensión o disminución de la intensidad de la corriente en un conductor, que se extiende progresivamente hasta la subestación y que va acompañada de una sobretensión considerable. El fenómeno fué llamado en algún tiempo "extra-ruptura", y tiene grandes semejanzas desde el punto de vista físico con el "golpe de ariete", que sufren las tuberías cuando se cierra con cierta rapidez una llave de agua. La sobretensión depende de la capacitancia del sistema y de su valor el cual puede ser calculado

como el producto de la variación de intensidad por la impedancia natural del circuito. Como ésta puede valer uno o varios centenares de Ohms, ya se puede imaginar cuanto será el aumento de potencial que sufrirá una línea aérea cuando se interrumpa bruscamente una corriente intensa.

b) Ondas de sobretensión producidas por la conexión de carga o cierre de circuitos, que consisten en una depresión súbita de potencial que se propaga a lo largo de la línea hasta la subestación, por un lado, y de un aumento súbito de potencial en la línea que se está conectando y que se propaga en dirección opuesta, por el otro. Aunque estas ondas no son por sí mismas peligrosas, están en condiciones de ser reflejadas, de cambiar de signo y de cambiarse unas con otras, produciéndose una sobretensión en algún instante posterior que en sí puede causar daño.

#### 2.4 RESONANCIA.

Cuando se interrumpe una corriente aparece una sobretensión, en la línea éste fenómeno se basa en el principio de la conservación de la energía, esto es, que existe una energía cinética debida al flujo de corriente, cuando se interrumpe el flujo de la corriente la energía cinética se transforma en energía potencial, apareciendo una tensión eléctrica entre las terminales de los contactos abiertos.

Esto también se puede explicar de la siguiente manera, la energía almacenada en la inductancia  $L$  de un transformador es  $1/2Li^2$  donde  $i$  es la magnitud de la corriente en el momento de interrumpirse. Al cerrar la circulación de corriente entre los contactos, la energía se transforma en electrostática, es decir en  $1/2C*V^2$ , donde  $C$  es la capacitancia del sistema y  $V$  es la tensión que aparece entre los contactos del interruptor.

A esta transferencia de energía almacenada en el campo magnético al campo eléctrico se realiza por medio de un fenómeno de resonancia, ésta ocurre cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva, esto es:

$$X_L = X_C$$

donde:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Igualando estas ecuaciones y despejando a f tenemos:

$$f = \frac{1}{2\pi(LC)^{1/2}}$$

De la última ecuación podemos observar que hay tres parámetros que hacen resonante a nuestro sistema y estos son frecuencia, inductancia y capacitancia.

Como para un sistema de distribución la frecuencia es constante, es decir, no tiene variaciones sensibles, la podemos descartar, y en cambio sí pueden variar la inductancia y la capacitancia debido a la distancia, tipo de construcción de la red, de transformadores o bien si el sistema es aéreo ó subterráneo.

Un ejemplo de este fenómeno se muestra en la siguiente figura 2.2:

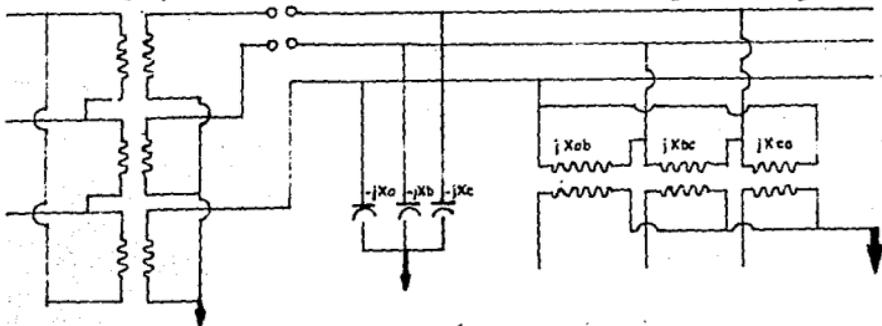


Figura 2.2.-Circuito con fases b y c abiertos.

En este circuito en el que están abiertas las dos fases b y c, y el transformador de distribución no tiene carga conectada, se reduce al circuito mostrado en la figura 2.3:

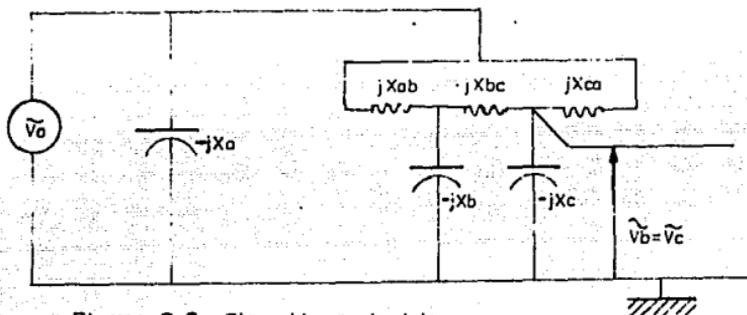


Figura 2.3. Circuito reducido.

El circuito puede simplificarse aún más tomando en cuenta que  $-jX_a = -jX_b = -jX_c$ ; y  $jX_{ab} = jX_{ca}$  y debido a la simetría del circuito no circula corriente por la reactancia  $jX_{bc}$  y que además desde el punto de vista de sobretensiones producidos por los dos conductores abiertos, no es necesario tomar en cuenta el capacitor  $C_a$  (éste puede considerarse, por ejemplo, como parte de la fuente de fuerza electromotriz), el circuito simplificado se muestra en la figura 2.4

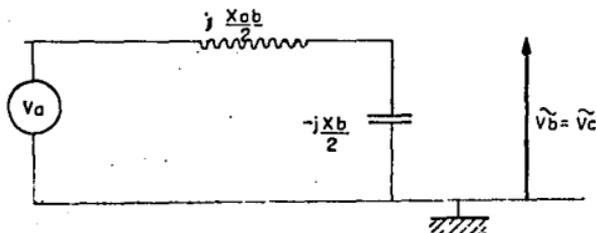


Figura 2.4. -Circuito simplificado.

Las tensiones a tierra de las fases b y c tienen el siguiente valor:

$$V_b = V_c = \frac{V_a}{\frac{JX_{ab} - JX_b}{2}} \left( -J \frac{X_b}{2} \right)$$

$$V_b = V_c = V_a \left( \frac{-X_b}{X_{ab} - X_b} \right) = V_a \left( \frac{-X_b}{1 - \frac{X_b}{X_{ab}}} \right)$$

Quando  $\frac{X_b}{X_{ab}} = 1$  se tiene  $V_b = V_c \implies -\infty$

Para estas condiciones de resonancia vistas anteriormente se puede producir sobretensiones muy altos.

El núcleo del transformador de distribución se saturará al alcanzar la tensión valores del orden de un 20% a un 30% mayor que el normal, lo que modifica la reactancia inductiva, para poder establecer la condición de resonancia es necesario conocer la característica de saturación del transformador.

En un circuito de distribución real la inductancia predominante en el fenómeno de resonancia es la reactancia inductiva del transformador representada por su núcleo, que tiene características de saturación que lo hacen no lineal, obligando que su análisis se lleve a cabo por medio de analizadores de redes o bien por métodos gráficos.

En este fenómeno el valor pico de la tensión se obtiene al igualar la energía almacenada en la inductancia del transformador con la energía electrostática y despejando el valor de tensión que aparece entre los contactos del interruptor, es decir,

$$1/2Li^2 \approx 1/2Cv^2$$

$$V \approx i(L/C)^{1/2}$$

Como resultado de lo anterior, en las especificaciones de los interruptores se debe establecer que al abrir un interruptor en ningún caso se debe producir una sobretensión mayor de 2.5 veces la tensión nominal y la red de tierra a la que se conecten los neutros de los transformadores deberá estar bien diseñada, además los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos de las subestaciones, y partes metálicas en general deben estar siempre conectadas a tierra.

## 2.5 FERRORESONANCIA.

La ferrosresonancia es un fenómeno indeseable que provoca sobretensiones que pueden dañar los aislamientos de las líneas de distribución subterránea. Este fenómeno se empieza a mencionar desde 1914, en los años treinta se investiga y en los sesentas se incrementó la aparición de este tipo de problemas en forma alarmante debido al empleo de sistemas subterráneos, es decir, con el uso de cables conectados a transformadores y operación de interruptores o cuchillas en forma monopolar. Este fenómeno se presenta en el momento de la apertura o cierre de la fuente de alimentación al no operar las tres fases al mismo tiempo, debido a la capacitancia de las líneas a tierra y a la inductancia no lineal de los devanados del transformador, que forman un circuito serie, el cual puede tener un valor que propicie la falla. Este valor se da cuando la reactancia capacitiva iguala la reactancia inductiva, la no linealidad la da el núcleo del transformador, de aquí

el nombre de ferresonancia. Los sistemas subterráneos son más susceptibles a este tipo de fallas porque tienen una mayor capacitancia a tierra.

Este fenómeno se presenta principalmente en instalaciones de tensión, mayores de 13,000 volts entre fases, en líneas largas de transmisión se puede presentar este fenómeno, pero tal situación no causará disturbios ya que usualmente una carga resistiva de solo el 5% de la capacitancia de la línea será adecuada para amortiguar las oscilaciones del sistema.

En un sistema típico de distribución, los valores relativos de inductancia y capacitancia son tales que es muy difícil que pueda ocurrir el fenómeno de ferresonancia.

En los sistemas de distribución el fenómeno de ferresonancia se puede presentar causado por condiciones de desbalanceo de fases (apertura o cierre monofásico de un circuito trifásico), la relación E/R de un cable puede ser tan grande que es suficiente para mantener las oscilaciones ferresonantes.

Las manifestaciones físicas del fenómeno de ferresonancia pueden ser visibles, como por ejemplo en fallas de apartarrayos, seccionadores, y en transformadores aún cuando en otras ocasiones no llegan a ser tan aparatosas, sí provocan efectos de envejecimiento en los aislamientos de los equipos del sistema debido a las sobretensiones las cuales llegan a alcanzar hasta seis veces su valor nominal dependiendo de la relación  $X_c$ (reactancia capacitiva)/ $X_m$ (reactancia magnetizante del transformador), la curva de saturación, el tiempo de interrupción o energización del sistema, resistencia efectiva del circuito, punto de magnetización del núcleo del transformador y varios factores más.

En la tabla 2.1 se muestran los problemas más frecuentes que pueden suceder dependiendo de la sobretensión sostenida causada por el fenómeno de ferresonancia:

| Tensión en % del nominal | problema probable                          |
|--------------------------|--|
| 110                      | ninguno                                    |
| 110 a 125                | sobre excitación o -<br>inversión de fases |
| 125 a 300                | fallas de apartarrayos                     |
| más de 300               | fallas de aislamiento                      |

Tabla 2.1. -Fallas producidas por sobretensiones debidas a la ferresonancia.

### 2.5.1 Cálculo de capacitancia.

La única capacitancia que influye sensiblemente en la posibilidad que se presente el fenómeno de ferresonancia es la capacitancia de secuencia cero de los cables ó líneas que intervienen en los circuitos de mediana tensión que se emplean en sistemas de distribución subterránea.

La capacitancia entre dos conductores se define como la razón de la carga de los conductores a la diferencia de potencial aplicada entre ellos y que en forma de ecuación se expresa como:

$$C = q/v$$

Donde:

q.- Carga entre los conductores en coulombs por kilometro.

v - Diferencia de potencial.

En los cables aislados, el cálculo de capacitancia depende de su construcción; si es monopolar o tripolar, provisto o no de pantallas; así como del material y espesor del aislamiento.

2.5.1.1 Cálculo de la capacitancia para cable monopolar con cubierta o pantalla metálica.

En este caso, el cable representa un capacitor en el que el conductor, que se encuentra al potencial de la línea, constituye una de las placas y la pantalla o cubierta metálica, que está a tierra, constituye la otra placa. Por último, el dieléctrico lo constituye el propio aislamiento.

En términos de la definición de capacitancia dada en la ecuación anterior, se puede demostrar que para este tipo de cables la capacitancia queda dada por:

$$C = \frac{0.0241 \text{ SIC} \times 10^{-6}}{\log (d_a/d_c)} \quad [\text{F/km}]$$

Donde:

SIC - Constante inductiva específica del aislamiento.

(ver tabla 2.2)

$d_a$  - Diámetro sobre el aislamiento.

$d_c$  - Diámetro bajo el aislamiento.

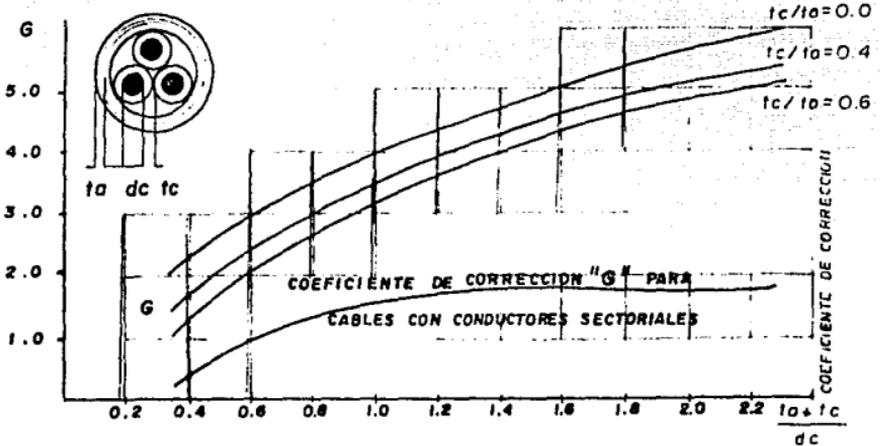
2.5.1.2 Cálculo de capacitancia para cable tripolar con cubierta común.

La capacitancia para este tipo de cables se da en función del llamado factor geométrico, G, de la siguiente manera:

$$C = \frac{0.106 \text{ SIC} \times 10^{-6}}{G} \quad [\text{F/Km}]$$

El factor geométrico lo determina la construcción del cable, es adimensional y depende únicamente de la relación entre conductores y aislamiento. Los valores adecuados para G pueden tomarse en la gráfica de la figura 2.5.

En el caso de conductores sectoriales, el factor geométrico es menor que para un conductor redondo de la misma sección y espesor de aislamiento; el valor correspondiente se obtiene al considerar al conductor sectorial en términos de su equivalente redondo y multiplicado por el factor de reducción también indicado en la gráfica de la figura 2.5.



Para encontrar el valor del factor geométrico  $G$  se debe efectuar lo siguiente:

1º Calcular las relaciones  $\frac{l_a + l_c}{d_c}$  y  $\frac{l_c}{l_a}$

2º Encontrar el valor de  $G$  de la gráfica. El valor de  $\frac{l_c}{l_a} = 0$

3º Si el cable es sectorial, multiplicar el factor geométrico  $G$  por el valor correspondiente del factor de corrección, utilizando como entrada a la gráfica la relación  $\frac{l_a + l_c}{d_c}$

Figura 2.5.-Coeficiente geométrico  $G$  empleado en el cálculo de la capacitancia.

| Valores de la constante inductiva específica (SIC) |       |          |     |     |
|--|-------|----------|-----|-----|
| AISLAMIENTO  | PAPEL | SINTENAX | XLP | EP  |
| SIC  | 3.9   | 9.0      | 2.1 | 2.6 |

Tabla 2.2

### 2.5.2 Operación monofásica de fusibles.

La operación de fusibles en sistemas subterráneos generalmente se encuentra relacionado con circuitos de falla, un porcentaje relativamente bajo carga es suficiente para prevenir el fenómeno de ferresonancia y una condición de falla elimina en todos los casos el cable, es decir, corto-circuita la capacitancia del cable, elemento indispensable también para que se produzca el fenómeno, en otras palabras, cuando el fusible opera la ferresonancia no se presenta en una línea, ya sea aérea o subterránea, ya que la corriente circulará a través de la capacitancia del cable. Las fallas que pueden fundir un fusible son:

1.-Falla permanente del cable(fase tierra o fase a fase) para fusibles localizados en el extremo de la alimentación del cable.

2.-Fallas en el primario del transformador para fusibles localizados en el primario del transformador o en el extremo de la alimentación del cable.

3.-En fallas secundarias en donde no opera la protección. En éste último caso el fusible del lado primario puede operar debido a una falla secundaria. Sin embargo, bajo éstas condiciones la carga en las otras fases permanece conectada después de que el fusible ha operado, de tal manera que el fenómeno de ferresonancia no se presenta.

Se puede concluir que en la operación de un fusible no es factible que se presente el fenómeno de ferresonancia, ya que el fusible sólo operará por una falla.

**2.6 PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES INTERNAS.**

A continuación se presentan algunas medidas de protección contra las sobretensiones que se originan internamente en los sistemas de distribución y en las instalaciones de los usuarios, asimismo se hace mención de las diferentes consideraciones acerca de su uso implementación en diferentes tipos de sistemas y de diferentes clases de sobretensiones posibles.

1.-Conexión del neutro del sistema a tierra, ya sea por medio de bobina, resistencia baja, o bien directamente, con objeto de suprimir los arcos a tierra. Empleo de algún mecanismo supresor de arcos a tierra.

2.-Empleo de los aditamentos para el regulador automáticamente el potencial de los transformadores de la subestación durante un circuito corto, suprimiendo la sobretensión que se produce al romperse el circuito, cuando no se emplean dichos aditamentos.

3.-Eliminación sistemática de las maniobras innecesarias de cierre o apertura de circuitos, cambios de bancos de transformación, líneas o cualquier elemento que sea capaz de originar sobretensiones. Los cables subterráneos, los capacitores y las líneas largas sin carga son los más peligrosos.

4.-Adopción de procedimientos modernos para disipar interruptores automáticos, que garanticen la continuidad del servicio en tanto no sean absolutamente indispensables que abran esos interruptores; empleo de resistencias amortiguadoras combinadas con los interruptores, que se conectan al circuito sólo en el instante de abrir o cerrar.

5.-Empleo de dispositivos de protección llamados "amortiguadores de alta frecuencia", en sus dos variedades más importantes: la bobina CAMPOS y el capacitor, originalmente creado por MOSCINSKI, cuya composición y conexión se muestra en la figura 2.6 al mismo tiempo:

La bobina campos se compone de un reactor sin núcleo  $L$  en paralelo con un resistor de mediana resistencia  $r$ . El capacitor Mosciski tiene la forma de botellas agrupadas en batería mixta, de acuerdo con la tensión del sistema y con el grado de protección que se desea. Los

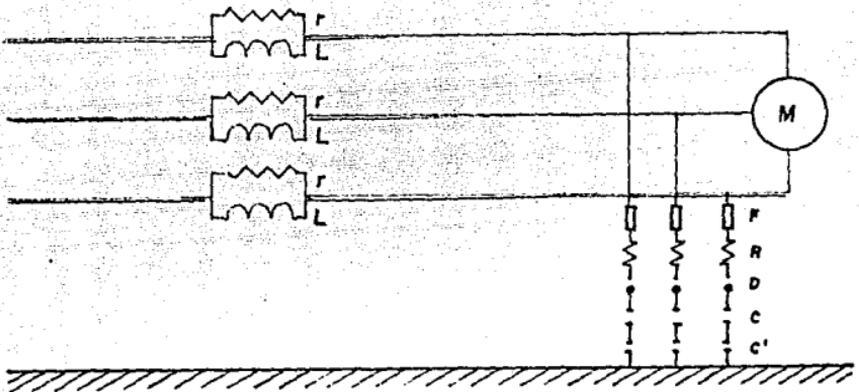


Figura 2.6.-Amortiguadores de alta frecuencia.

capacitores  $C$  y  $C'$  están conectados con un resistor  $R$  apropiado para evitar resonancia y además absorber parte de la energía que recibe y devuelve el capacitor. Generalmente se usa un fusible  $F$  y un detonador  $D$  en cada fase.

La teoría demuestra que en líneas de tensión baja es más efectiva la bobina que el capacitor, y que, en líneas de tensión alta, es más efectivo el capacitor que la bobina. Pero por razones de costo es más usada la bobina que el capacitor en alta tensión; y generalmente se prefiere el capacitor a la bobina en baja tensión. Actualmente hay otros tipos de capacitores en el mercado, algunos de ellos sin resistor ni detonador. Este último sirve sólo para evitar el paso incesante de corriente capacitiva a través del amortiguador y puede ser omitido; en cuanto al resistor, este puede también ser omitido si la resistencia de contacto del aparato a tierra tiene valor y calidad necesarios.

La operación de las bobinas se basa en el comportamiento de las ondas que encuentran una resistencia en su camino y no pueden pasar inmediatamente por la inductancia acompañante. La operación del capacitor se basa en el comportamiento de las ondas que encuentran una resistencia baja derivada en su camino y son desviadas por ellas.

6.-Combinación armónica de los dispositivos de protectores y designación adecuada de cada uno de ellos. No siendo aplicable conectar la protección de un sistema en uno solo aparato o dispositivo y teniendo la sobretensiones orígenes tan variados, es necesario distribuir la función entre varios elementos, en forma tal que no sólo se sumen sus efectos sino que cubran todo el sistema sin dejar una porción expuesta.

7.-Coordinación de aislamiento frente a sobretensiones de origen interno.

Como base para efectuar coordinación de aislamiento, deben de considerarse:

- Las sobretensiones presentes en el sistema.
- La rigidez dieléctrica del material utilizado.
- los medios de protección frente a sobretensiones.
- El grado de seguridad deseado frente a las sobretensiones.

Se asocian varios niveles de tensión resistida a cada tensión de servicio (ver tabla 2.1) por lo que la selección económica y óptima es factible asumiendo los pertinentes riesgos ya que se estudian los fenómenos de manera estadística. Claro que, para una estructura dada de red, no hay un sólo y único método que aporta la solución, sino que el óptimo se obtiene por iteración que toma en cuenta factores económicos y técnicos. En la figura 2.7 se muestran los caminos que deben de recorrerse en secuencia lógica varias veces, para encontrar el óptimo.

Entre los procedimientos que se han indicado como "otras medidas" y como "estructura de red", se emplean los inductores en derivación controlados por tiristores. Ellos limitan las sobretensiones temporales y mejoran la estabilidad, pues si se admitieran inductores ideales, en



En la figura 2.8 se ilustra esquemáticamente la operación de los inductores controlados por tiristor, mostrándose los pulsos de encendido en el oscilograma inferior, asociados al dibujo esquemático del tiristor involucrado.

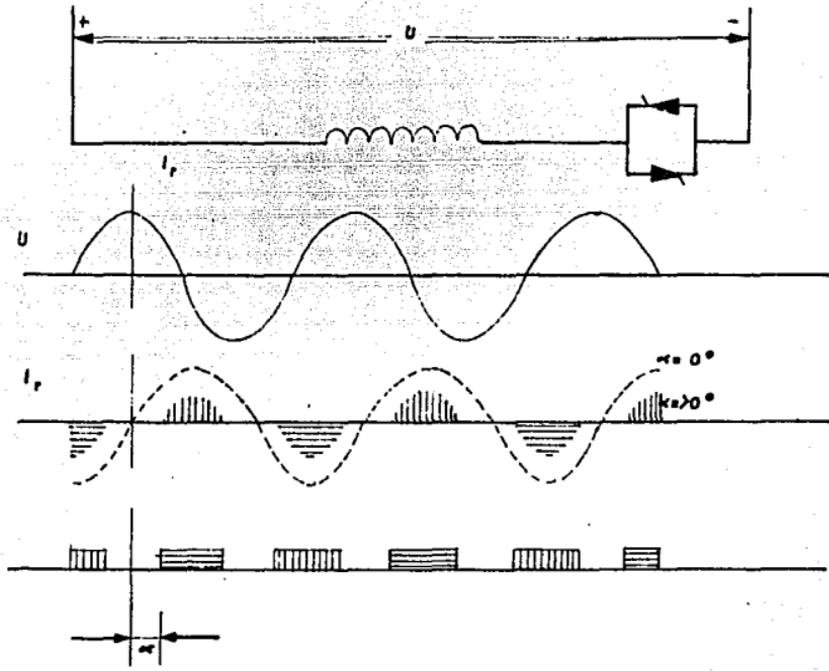


Figura 2.8.- Operación de los inductores controlados por tiristores.

En la figura 2.9 se muestran los diferentes tipos de sobretensiones, calificadas en cuanto su amplitud y duración. El valor de referencia es la tensión máxima de servicio en valor de cresta.

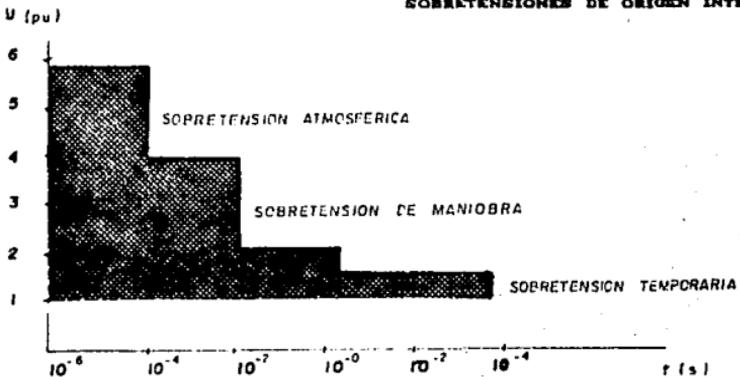


Figura 2.9. - Clasificación de las sobretensiones.

## 2.7 FLUCTUACIONES TRANSITORIAS DE TENSION EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION PROVOCADAS POR LA OPERACION DE HORNOS ELECTRICOS DE ARCO.

Las fluctuaciones transitorias de tensión y la generación de de armónicas en los sistemas de distribución que alimentan a los usuarios industriales y domésticos producidas durante la operación de hornos eléctricos de arco, afectan al alumbrado, además de perturbar el funcionamiento y de reducir la vida útil de los aparatos eléctricos y electrónicos.

En las primeras etapas de operación de los hornos de arco ocurren grandes irregularidades fluctuaciones de carga, particularmente al iniciarse el proceso de fusión cuando la cantidad de material metálico (chatarra) que contiene el horno se encuentra frío. En posteriores etapas de operación, tales fluctuaciones se hacen cíclicas y causan frecuentes disturbios en los sistemas de distribución de energía eléctrica, lo que afecta la tensión que se suministra a otros usuarios conectados al mismo bus de distribución, repercutiendo en el funcionamiento de sus aparatos eléctricos y en sistemas de iluminación donde se presenta un molesto parpadeo.

Durante la operación del horno, la resistencia de los arcos sufre cambios continuos debido principalmente al movimiento de la chatarra, burbujeo de metal fundido, repulsión magnética de cada arco, entre sí, así como a los esfuerzos de repulsión magnética de los electrodos, misma que se refleja en sus respectivos valores de reactancia.

La no linealidad del comportamiento eléctrico de los arcos y los parámetros del horno resultan en la generación de armónicas cuya magnitud no puede determinarse con facilidad por la impresindible naturaleza del arco y porque está bajo el orden de las armónicas generadas.

Una vez que se presente la fuente de armónicas, todo lo que se necesita es tener una trayectoria en el sistema eléctrico para que éstas fluyan a través de él, y si esto ocurre, entonses los problemas que se presentarán podran tener efectos dañinos sobre el mismo. Tanto las magnitudes de las armónicas como sus efectos sobre el sistema dependerán de los parámetros particulares de cada horno.

Cuando existen fluctuaciones de tensión en el sistema de potencia, el problema no es su tamaño medio, sino estimar la probabilidad de que estas causen quejas por parpadeo en el alumbrado, el nivel tolerable de fluctuaciones en un sistema debe ser aquél en el que sólo pocos consumidores lo encuentren inconveniente.

Para disminuir los disturbios que provocan los hornos eléctricos de arco en los sistemas de distribución de energía eléctrica, existen una amplia gama de soluciones que pueden emplearse para resolver éste tipo de problemas. La eficiencia y el costo de cada uno depende de las características propias del sistema de alimentación al horno y del nivel de fluctuaciones de tensión (parpadeo).

A continuación se presenta una breve descripción de las soluciones más comunes:

1.- Cambios en el sistema de alimentación.

El objetivo de cambiar el sistema de alimentación es reducir la impedancia entre las fuentes generadoras y el punto de conexión común a otros usuarios, ésto puede lograrse al hacer al sistema las modificaciones:

a).- Aumento de potencial al conectar transformadores adicionales en paralelo, como se muestra en la figura 2.10:

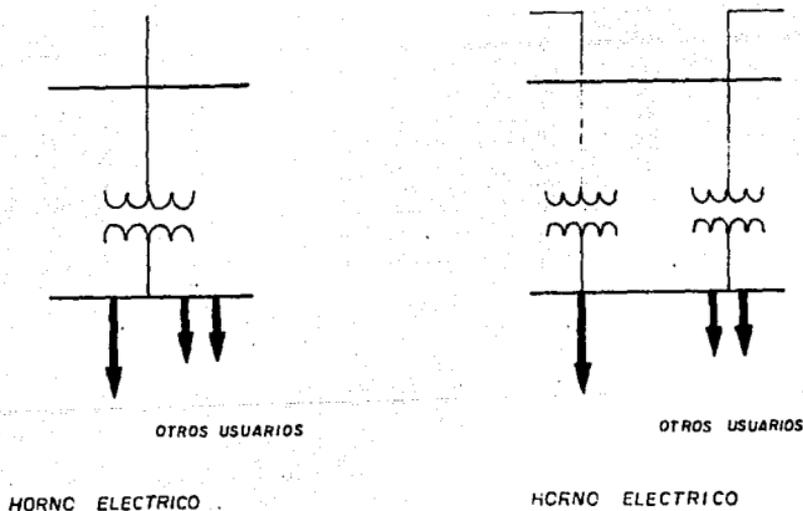


Figura 2.10.-Aumento de potencia al conectar transformadores en paralelo.

## SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO

b).- Cambiar el punto de conexión común a otro, cuyo nivel de falla sea mayor, generalmente en una tensión más alta (véase la Fig.2.11a).

c).- Dividir el bus de alimentación en dos secciones : una para alimentar carga comercial y otra para cargas industriales con hornos eléctricos (véase la Fig.2.11b).

d).- Incremento en los calibres de los alimentadores de baja tensión.

e).- Otro método de solución, quizá el más drástico, sería cambiar la tensión de alimentación primario a uno mayor.

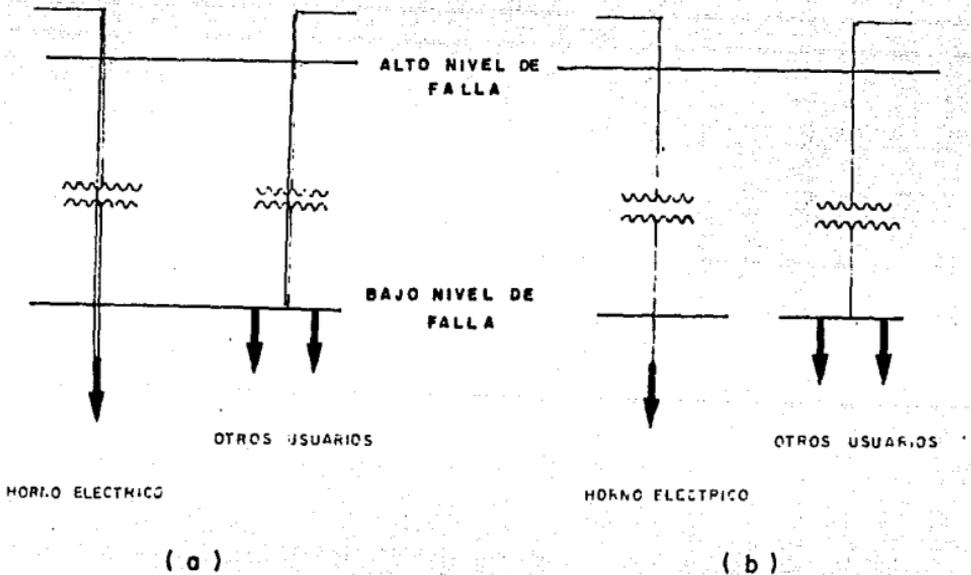


Figura 2.11. - Cambio del punto de conexión a un mayor nivel de falla.

## 2.- Condensadores síncronos.

En general, la impedancia del sistema es predominantemente inductiva y la fluctuación la causan corrientes de bajo factor de potencia; por lo tanto, la caída de tensión se debe al componente reactivo de la impedancia.

La respuesta de compensación de los capacitores síncronos es lenta comparada con las fluctuaciones de tensión, por lo que se utilizan capacitores síncronos equipados con sistemas de excitación controlados con tiristores que reducen el tiempo de respuesta. Entre las ventajas que ofrece éste método se encuentra que, a través de la tecnología desarrollada hasta ahora se conoce muy bien su funcionamiento aunque puede presentar los siguientes problemas:

- \* Los cambios de corrientes de excitación no fluyen uniformemente en todas las fases, lo que presenta un inconveniente considerando que la carga (el horno) es desbalanceada.
- \* Las pérdidas de potencia son altas.
- \* Para su instalación se requiere de una gran obra civil.
- \* Este equipo implica una fuerte inversión inicial y un alto costo de mantenimiento.

## 3.-Capacitores serie.

Estos equipos se usan comúnmente para compensar la caída de tensión y corrección del factor de potencia. Su efecto correctivo es instantáneo, porque los capacitores se encuentran en serie, lo que es quizá su mayor ventaja, debido a que las modificaciones en la corriente de línea causan un cambio inmediato en la tensión compensadora.

Estos capacitores son efectivos para reducir las fluctuaciones causadas por la instalación de hornos eléctricos de arco y su efecto compensador se da únicamente a partir del punto de instalación.

4.-Capacitores con tiristores de maniobra.

Los capacitores se accionan muy rápidamente mediante tiristores para balancear directamente los incrementos de carga reactiva atrasada que se presente durante la operación del horno eléctrico y mantienen la combinación de estas cargas en un alto factor de potencia, sus ventajas son que las pérdidas de potencia son bajas; si el horno se encuentra fuera de operación, el equipo compensador también lo está; durante su operación no se generan armónicas; la capacidad del banco de capacitores puede incrementarse fácilmente, no se requieren grandes obras civiles para su instalación. En cuanto a sus desventajas sólo tenemos que el tiempo de respuesta es adecuado sólo para un bajo porcentaje de su operación.

5.-Reactor de desacoplamiento.

La utilización de este método de compensación se restringe sólo cuando las demandas de corriente son independientes en cada uno de los alimentadores, tal como se muestra en la figura 2.12:

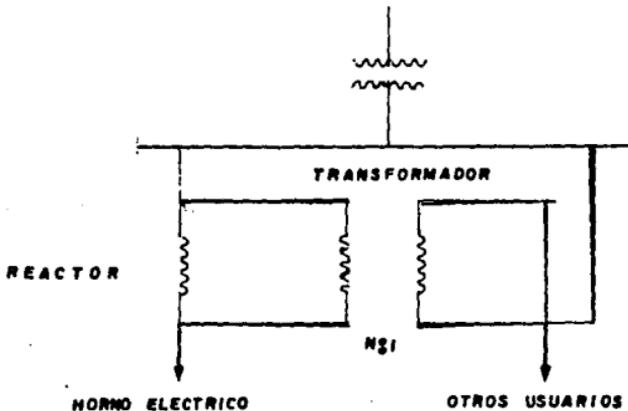


Figura 2.12. - Reactor de desacoplamiento.

La corriente demandada por la carga fluctuante del horno ocasiona una caída de tensión en el bus que lo alimenta; para compensar esta caída, se instala en el alimentador al horno una impedancia adecuada que tendrá una caída proporcional a la del bus. Con la ayuda de un transformador, como se muestra en la figura 2.12, se transfiere y suma la tensión de ésta impedancia al del bus.

Las ventajas que tiene es que no introduce armónicas y la capacitancia del transformador del equipo compensador es pequeña comparada con los de los alimentadores.

Las desventajas son que puede resultar elevado el costo de ajuste automático para mantener constante la relación de impedancias entre el suministro y el equipo compensador.

#### 6.-Reactores con tiristores de maniobra.

En este equipo la potencia reactiva en el horno y en los reactores se mide y controla de tal manera que la suma sea constante.

Un capacitor fijo se instala para disminuir la reactancia equivalente del sistema hasta obtener un valor tal que pueda compensar los reactores.

Sus ventajas son que el tiempo de respuesta es rápido, y la compensación se lleva a cabo en cada fase. Durante su operación no se generan armónicas.

Su desventaja es que la pérdidas de potencia son mayores que las del equipo provistos de capacitores con tiristores de maniobra, debido a que si el horno se encuentra en la etapa de menor potencia, el banco de reactores opera a su máxima capacidad.

#### 7.-Reactores controlados con tiristores.

El uso de tiristores en equipos de compensación ha mejorado los tiempos de respuesta.

La potencia reactiva durante la operación del compensador disminuye continuamente desde un valor máximo hasta cero, el encendido de los tiristores dependerá de las mediciones de tensión que reciban y en esta forma se conectarán los reactores compensadores.

Las ventajas de éste son que el valor medio de tiempo de respuesta es rápido y la compensación se lleva a cabo en cada una de las fases.

su desventaja es que tiene grandes pérdidas de potencia y el equipo generará armónicas.

#### B.-Reactor saturado.

La compensación de reactivos por éste sistema disminuye con forma aumenta la carga del horno. La función de este equipo es proporcionar cantidades variables de reactivos, de tal forma que la carga combinada del horno y compensador se mantengan constantes; para corregir el factor de potencia total y absorber armónicas es necesario instalar un banco de capacitores.

Dentro de sus ventajas tenemos que para su operación no requiere de equipo auxiliar de medición y el tiempo de respuesta es adecuado.

En sus desventajas tenemos que debido a que éste tipo de reactores es más sensible la tensión y que este último varía menos que la potencia reactiva, el control será, por tanto menos exacto que en aquellos equipos que son sensibles a las variaciones de potencia; en comparación con otros métodos, sus pérdidas son mayores y producen un alto nivel de ruido.

Las causas principales de la presencia de armónicas en los sistemas eléctricos de distribución son:

- a) Al operar los hornos a un bajo factor de potencia, se incrementa la potencia reactiva, por lo que es necesario utilizar un gran capacitor compensador. El uso de este capacitor disminuye la frecuencia de resonancia del sistema eléctrico, tal disminución

es nociva para el sistema ya que generalmente a baja frecuencias la amplitud de las armónicas es alta.

- b) Los transformadores actuales, fabricados con núcleos de acero de granos orientados, tienen un punto de saturación mayor que los construidos anteriormente, lo cual incrementa las armónicas contenidas en su corriente de excitación. La presencia de estas armónicas en el sistema eléctrico pueden causar serios problemas al accionar los mecanismos de disparo de los equipos de protección, así como provocar interferencias en algunos equipos de control.

En general para resolver problemas ocasionados por la presencia de armónicas, se presentan las siguientes opciones:

- a).-Modificar a un valor adecuado la frecuencia de resonancia del sistema, mediante la reducción o incremento de la capacidad nominal del capacitor.
- b).-Retrasar el disparo de los relevadores, ajustándolos a un valor permisible de carga del capacitor.
- c).-Seleccionar un tipo de relevadores que tengan una mayor gama de ajustes.
- d).-Conectar un reactor en serie con el capacitor, calculándolo para obtener una resonancia adecuada.

Finalmente podemos decir que la selección del método más adecuado para reducir las fluctuaciones de tensión dependerá de las características y del análisis del problema en cada caso particular.

## 2.8

### CONCLUSIONES.

El Fenómeno de ferresonancia en sistemas de distribución es en general, de una probabilidad bastante baja, esto debido al gran número

de condiciones que se deben de conjuntar en un mismo instante para la presencia del fenómeno, lo cual es sumamente difícil que ocurra, sin embargo, éste fenómeno puede suceder a medida que el sistema reúne mayor número de condiciones que faciliten el fenómeno.

Uno de los métodos más recomendables para disminuir la probabilidad de presencia del fenómeno en sistemas de distribución de tensión menor de 23,000 volts es el empleo de transformadores conectados en estrella/estrella, ya que ésta conexión provee una trayectoria a tierra, con lo que se evita el cierre del circuito a través de la capacitancia de los cables, en la apertura o cierre monopolar del interruptor. Existen sin embargo, algunos sistemas, para los cuales ésta solución es sumamente costosa, por lo cual se pueden considerar otros métodos que pueden dar buenos resultados, entre ellos podemos enlistar los siguientes:

- 1.- Empleo de interruptores de operación tripolar en los transformadores.
- 2.- Evitar el cierre o apertura de un transformador o grupos de transformadores sin carga, desde el poste de acometida energizada; siempre se realiza primeramente la conexión del cable y después los transformadores.
- 3.- Operar los transformadores con el porcentaje mínimo de carga recomendada.

En los interruptores trifásicos, la apertura de los contactos por lo general se trata de hacer simultáneamente, pero conviene que haya una dispersión de un milisegundo entre los tres polos, la dispersión es la diferencia que existe entre el instante de cierre del primero y el instante de cierre del último polo del interruptor, el empleo de ésta dispersión es importante, pues sirve para reducir las sobretensiones debidas por impulso de maniobra.

#### SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO

Si el interruptor es de operación monopolar, puede ser benéfico usar recierre monopolar. Aquí la dispersión puede aumentar hasta cuatro milisegundos.

El fenómeno de ferresonancia es, en conclusión, una situación de operación que puede presentar en los sistemas de distribución y por lo tanto se hace necesario tomar medidas para evitar que se causen serios problemas en el sistema.

# **CAPITULO 3**

## **SOBRETENSIONES DE ORIGEN EXTERNO**

### 3.1 INTRODUCCION.

La descargas atmosférica es uno de los fenómenos mas asombrosos de la naturaleza que ocurren con relativa frecuencia y cuyos efectos nos afectan de diversas formas. Mucha gente relata incidentes de las descargas atmosféricas en construcciones o casas y sus efectos destructivo. Este fenómeno causa daños muy extensos a nivel mundial anualmente y en particular a los sistemas eléctricos.

El problema más obvio en los sistemas eléctricos debido a las descargas atmosféricas son las interrupciones en el servicio. En la mayoría de los sistemas eléctricos se sabe por estadística, que aproximadamente un 85% de las interrupciones de servicio en líneas de distribución se deben a sobretensiones por descargas atmosféricas. Le sigue en importancia el daño al equipo. Anualmente las descargas atmosféricas son la causa de pérdidas de millones de pesos por daños a transformadores, conductores, aisladores, postes, etc.

El presente capítulo se orienta hacia los siguientes aspectos: uno se refiere al origen de las sobretensiones por descargas atmosféricas y el otro al efecto que producen sobre los sistemas eléctricos de distribución, otro aspecto importante es el que se refiere a las recomendaciones encaminadas a aportar soluciones, las cuales se mencionarán en el capítulo 5.

## 3.2

## NATURALEZA DE LA DESCARGA ATMOSFERICA.

El principio de la formación del rayo más aceptado actualmente es el conocido como mecanismo de congelación de Workman. El mismo establece que el aire al calentarse sobre la superficie de la tierra origina corrientes ascendentes; al mezclarse éstas con el aire frío en las capas superiores de la atmósfera, por efectos de condensación, dan origen a gotas de agua o cristales de hielo, que se mantienen en suspensión y cuando chocan con la corriente de aire restante o nuevas corrientes adquieren carga negativa. El fenómeno reproducido en forma continua dará lugar a la formación de nubes cargadas. La carga puede ser uniforme, pero generalmente presenta varias zonas de concentración en una misma nube, en la gran mayoría de las nubes (90%) se acumulan en la base de la nube las cargas negativas y las cargas positivas en la región superior, como se aprecia en la figura 3.1.

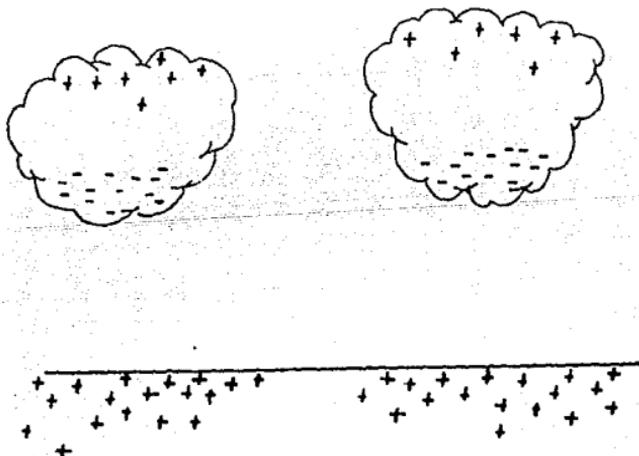


Figura 3.1.- Concentración de cargas en una nube.

Como resultado de éste proceso que se tiene lugar durante las tormentas, se acumulan cargas en las nubes y por efecto electrostático se inducen en la superficie de la tierra cargas iguales y opuestas, originando los potenciales necesarios para formar un rayo. Cuando se incrementan las cargas, aumenta el potencial entre las nubes y la tierra y en consecuencia el gradiente de potencial en el aire (volts por centímetro). Cuando el gradiente excede la resistencia dieléctrica de la porción del aire contenida a través de donde se aplica, el aire se ioniza y se forma un cauce ó guía entre la nube y la tierra. La guía se dirige a tierra cargando al aire a su paso. Mientras el centro de la carga de la nube pueda proveer suficiente carga para mantener en el extremo del rayo un gradiente de potencial mayor que la resistencia dieléctrica del aire, la guía continúa su curso. En ocasiones, el gradiente no se mantiene y entonces la guía se detiene y se dispara, pero la mayor parte de las veces ésta se propaga hasta que hace contacto con la tierra ó con un objeto sobre ella. La corriente de la guía no es alta; probablemente sea menor que unos cientos de amperes. Su velocidad de propagación es de aproximadamente un 30% de la velocidad de la luz.

Cuando la guía se aproxima a la tierra, se incrementa el campo electrostático y aumenta el gradiente en la superficie de la tierra. Finalmente, ésta crece lo suficiente como para provocar una descarga ascendente que se eleva desde la tierra. El punto de incidencia queda determinado cuando la guía descendente se encuentra con alguna de las guías ascendentes; esto es, el punto inicial de cualquiera de las guías ascendentes que ha hecho primero contacto con el rayo, será el sitio donde termina el rayo, y recibirá una inyección de corriente que dependerá de la magnitud de la carga asociada a la guía descendente.

Se ha observado que no existen rayos normalizados en la naturaleza, sino que las corrientes producidas después del contacto varían en gamas muy amplias siendo sin embargo, excepcionalmente altas, pero la duración de éstas corrientes es pequeña, ya que en general, la corriente de descarga sube hasta su máximo en aproximadamente unos 2 o 4  $\mu$ s, para

bajar a la mitad en 10 a 100  $\mu$ s, siendo la duración total de varios miles de microsegundos como se ilustra figura 3.2.

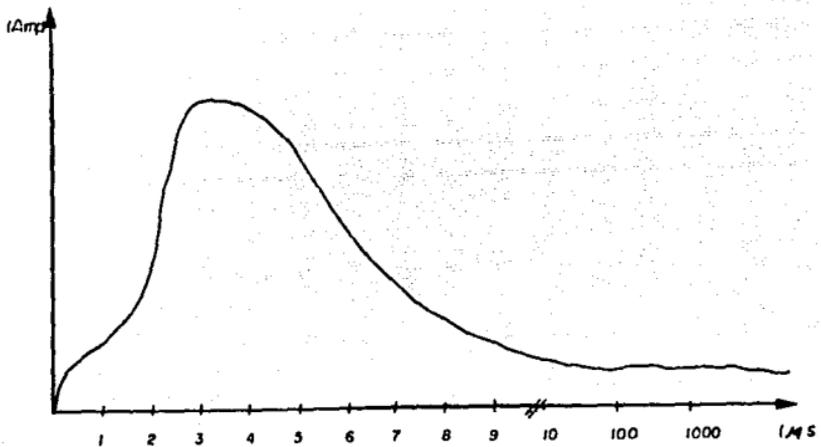


Figura 3.2.-Onda de sobrecorriente.

Se ha observado también que los picos de alta corriente y corta duración son destructivos en tanto que comúnmente ocasionan daños materiales, aunque no originan incendios. Las porciones de baja corriente y relativa baja duración, en cambio, son capaces de encender materiales flamables. Las componentes de de alta corriente son las más nocivas para aparatos eléctricos, pues producen mayores tensiones que las de baja corriente.

Ocurre frecuentemente que las diversas concentraciones de carga de una misma nube utilizan un mismo cauce, produciéndose entonces descargas sucesivas. Estas pueden repetirse tan rápidamente que no es posible distinguir los destellos a simple vista. Estos fenómenos llamados descargas sucesivas, pueden repetirse numerosas veces después de la descarga principal, las estadísticas de las mediciones efectuadas muestran que más del 80% de los rayos tienen por lo menos dos descargas.

Las descargas atmosféricas pueden ocurrir entre nubes, entre centros de carga separadas dentro de una misma nube ó entre una nube y la tierra. La mayor parte de las descargas ocurren entre las nubes ó en su interior, pero muchas caen a tierra.

### 3.2.1 Parámetros de la descarga atmosférica.

Los parámetros eléctricos de la descarga que son útiles para el análisis de la protección de los sistemas eléctricos de distribución, son los siguientes:

- La forma de onda.
- La magnitud de corriente.
- El número de descargas sucesivas.

Para definir la forma de onda de la corriente de las descargas, se considera su tiempo de crecimiento y su tiempo de decaimiento (fig. 3.2). El valor promedio de la magnitud de la corriente es de 25 KA y el número promedio de descargas sucesivas es de 3 y en ocasiones se han logrado registrar hasta 40 descargas sucesivas.

### 3.2.2 Número de rayos que terminan en la línea.

El conocimiento del número de rayos probables que terminan en la línea de distribución se puede obtener por el método que se basa en el

concepto de área blindada por la línea. Este método se desarrolló en forma empírica.

El método establece que la línea es capaz de interceptar el número de rayos que inciden en un área equivalente a un ancho de 4 veces la altura del conductor o conductores más elevados de la línea. En la figura 3.3 se muestra el efecto y significado de ésta consideración.

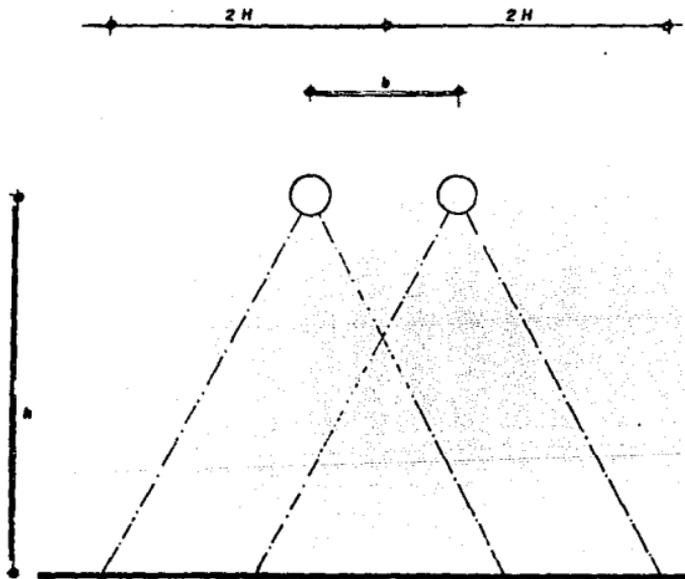


Figura 3.3.-Ancho del terreno blindado por la línea.

En forma analítica tendremos lo siguiente:

$$NL = SD \times A$$

Donde:

NL : Rayos probables a la línea.

SD : Densidad de rayos a tierra.

A : Area blindada por la línea.

El área blindada por la línea se obtiene de la siguiente expresión:

$$A = (4h + b) \times l$$

Donde:

h : Altura de la línea.

b : Separación entre los conductores más elevados.

l : Longitud de la línea.

La densidad de rayos a tierra es el número de rayos esperado a tierra en la unidad de área; la estimación de éste parámetro se basa en el nivel isoceraúnico dado en días de tormenta, definido el día de tormenta como aquel en que se escucha uno ó más truenos; entonces:

$$SD = K \times IL$$

Donde:

K : Factor de proporcionalidad.

IL: Nivel isoceraúnico.

El factor de proporcionalidad K varía en el rango comprendido entre 0.25 a 0.5 según la literatura; en la figura 3.4 se muestra el resultado logrado por éste método para 100 kilómetros de línea durante un año con diferente nivel isoceraúnico y alturas en la línea.

## SOBRE TENSIONES DE ORIGEN EXTERNO

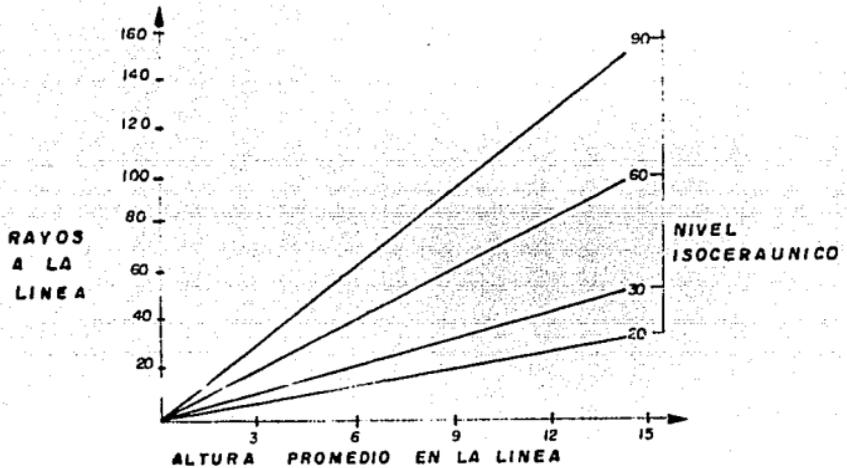


Figura 3.4.-Distribución del número de rayos en la línea.

La figura 3.5 es un mapa de isodensidad de rayos a tierra obtenido con los registros de los contadores de rayos a tierra.

La información utilizada abarca registros acumulados del periodo 1983-1987. El mapa muestra líneas de igual densidad de rayos a tierra.



Figura 3.5.-Mapa de isodensidad. Periodo 1983-1987  
(Crayos/km<sup>2</sup>/año)

### 3.3 ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Las sobretensiones de origen externo producen efectos perniciosos en líneas y máquinas, que dependen principalmente de la frecuencia con que llegue la corriente debida a la descarga atmosférica.

Las tensiones que se inducen en la línea de distribución debidos a los fenómenos atmosféricos pueden producirse de dos formas diferentes:

#### 3.3.1 Por inducción electrostática.

Estas cargas que aparecen en los conductores son debidas a la electrización de las nubes tempestuosas y las que prodicen granizo. Respecto a la electrización de nuestra atmósfera se sabe hoy día que durante buen tiempo la atmósfera se encuentra siempre en su potencial superior al de la tierra, y que éste potencial aumenta con la altura a razón promedio de 100 a 150 volts por metro, pero dependiendo de las condiciones atmosféricas puede aumentar a razón de 300 a 400 volts por metro.

La sobretensión se produce de la siguiente forma: la acumulación de carga de una nube que se encuentra sobre la línea de distribución induce en los conductores de ésta una carga de polaridad contraria, la cual se va acumulando gradualmente, si se produce una descarga de la nube a tierra ó de nube a nube, la carga eléctrica de la nube desaparece bruscamente y deja en libertad la carga eléctrica acumulada en los conductores la cual se propaga a lo largo de la línea en forma de ondas viajeras; las mediciones realizadas en líneas de transmisión han demostrado que éste tipo de sobretensiones son de magnitud relativamente pequeña y de polaridad generalmente positiva, en consecuencia sólo

afecta a las líneas de distribución o subtransmisión con tensiones de operación del orden de 35KV ó menos.

### 3.3.2 Por descarga directa en la línea.

Las sobretensiones directas son producidas por el rayo que cae sobre la línea misma.

Por fortuna el caso del rayo sobre la línea se presenta en muy pocas ocasiones; pero cuando ocurre, no existe protección eficaz y práctica que evite sus efectos.

### 3.4 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

El efecto de los sobretensiones debidos a las descargas atmosféricas se discuten, con particular énfasis, en la manera que éstas se inyectan en los circuitos de distribución. Se examina el efecto que puede tener éstas sobretensiones en equipo electrónico.

El equipo antiguo que se utilizaba circuitos con bulbos y relevadores era comparativamente inmune a los disturbios de la línea de suministro, pero el equipo moderno de oficina y doméstico que emplean dispositivos de estado sólido, generalmente requiere cierta forma de protección. Los transitorios de alto tensión pueden ser destructivos, y las crestas rápidas de más baja amplitud y las oscilaciones remanentes de la operación de tensión de dispositivos al ser conectados puede ser una causa seria de mal funcionamiento del sistema.

Los efectos producidos por sobretensiones de origen atmosférico se pueden clasificar esencialmente en:

- Descarga directa del rayo.
- Descarga cercana del rayo.
- Descarga lejana del rayo.

La fig. 3.6 muestra las causas de las sobretensiones al producirse descargas atmosféricas.

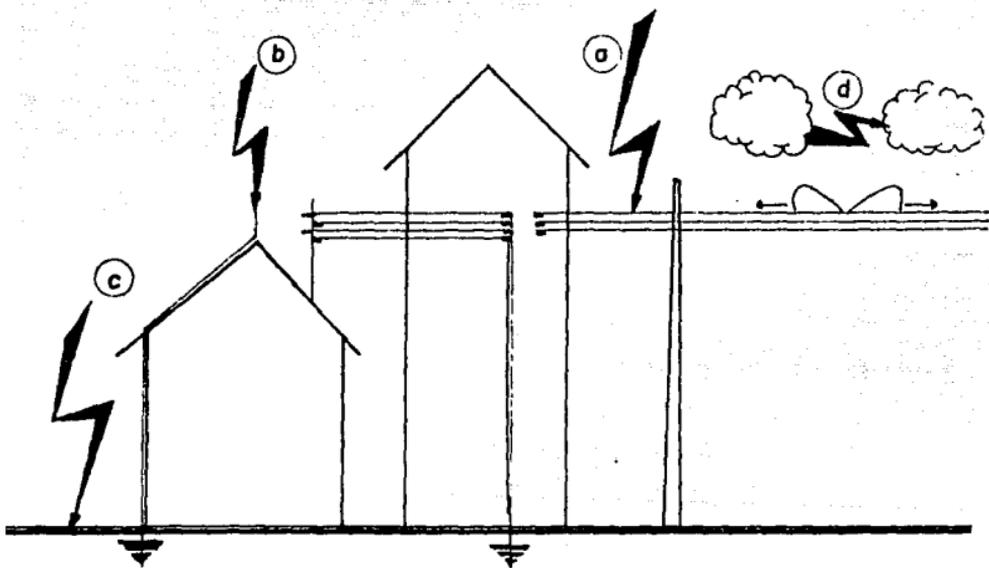


Fig. 3.6. - Causas de las sobretensiones.

- a) Descarga directa del rayo en la línea.
- b) Descarga en la instalación de pararrayos, cables aéreos de baja tensión ó estructuras metálicas en instalaciones industriales.
- c) Descarga a distancia.
- d) Ondas progresivas de sobretensión sobre la línea de media tensión a causas de descargas de rayos de nube a nube, o respectivamente causas de descargas atmosféricas las proximidades de la línea aérea.

#### **3.4.1. Descarga directa al circuito de distribución primario.**

Un rayo directo al circuito de distribución primario induce altas corrientes en el circuito. Esto produce sobretensiones en el suministro de 220 volts por virtud del flujo de corriente a través de la resistencia de tierra o a través de la impedancia característica del conductor.

En el caso de descarga en el circuito primario (aún descargas de baja energía) que causa la operación de los apartarrayos, la  $dv/dt$  asociado con la apertura y cierre de éstos dispositivos puede acoplarse a través de la capacidad de los interbobinados del transformador de distribución y producir altas tensiones en el circuito secundario, adicionales a aquellos asociados con la acción normal del transformador.

### 3.4.2 Descarga directa al circuito de distribución secundario.

Una descarga directa al circuito de distribución secundaria (220 volts), se pueden involucrar corrientes muy altas que excedan la capacidad de los dispositivos de protección convencionales. Si el rayo cayó cerca de la carga sensitiva es probable que el efecto sea fatal, aún con el mejor equipo de protección. Sin embargo, cuando la carga es situada en el interior de un edificio, en un punto alejado de la acometida de servicio, el flameo de los switches de distribución junto con la protección dentro del equipo puede salvarlo. Afortunadamente, éste tipo de descargas directas son raras, particularmente con el incremento de la utilización de la distribución subterránea.

### 3.4.3 Descargas lejanas del rayo sobre la línea.

Cuando se habla de descargas de rayos a distancia se puede tratar, ya sea de ondas viajeras de sobretensión a causa de descargas de rayos de nube a nube, que liberan cargas que son reflejadas y que se propagan en los conductores en forma errática o que inducen sobretensiones en las líneas; o bien de descargas de rayo en las proximidades de la línea aérea. Un rayo que no cae en la línea de distribución y que pega en un objeto cercano, estableciendo campos electromagnéticos que inducen tensiones en los conductores de abastecimiento, se ilustra en figura 3.7 :

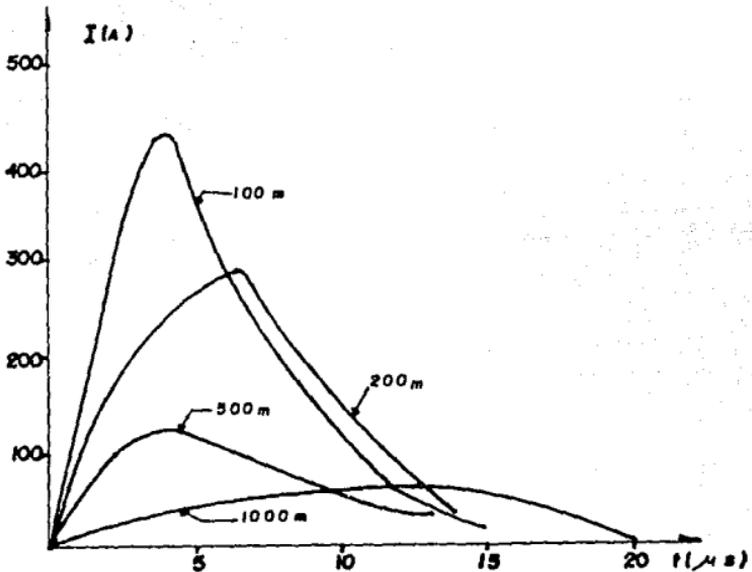


Figura 3.7.-Magnitud de la corriente inducida por un rayo a varias distancias de la línea.

### 3.5 EFECTO DE LA DESCARGA ATMOSFERICA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION SUBTERRANEA.

Cuando una descarga atmosférica incide sobre una línea eléctrica hay una zona que se extiende a cada lado de la descarga donde la tensión inducida del rayo puede exceder considerablemente el nivel de aislamiento de la línea y el flameo a tierra ocurrirá instantáneamente. Simultáneamente, se generaran ondas viajeras en los conductores a cada

lado del punto descarga. Estas ondas viajeras tienen dos componentes: tensión y corriente. La magnitud de la tensión es igual a la magnitud de la corriente multiplicada por la impedancia característica de la línea y es mayor que la tensión de flameo del aislamiento del sistema. Estas ondas viajan a lo largo de la línea aérea, a una velocidad aproximada de 340.8 metros por segundo. figura 3.8.

Una sobretensión típica tiene un frente de onda extremadamente ascendente, lo que significa que ésta tensión se está elevando a razón de miles de volts por microsegundo. El frente de onda casi vertical es seguido por una corta cola de onda lo que significa que después de que llega la tensión de cresta, la onda de sobretensión disminuye a la mitad del valor de cresta en alrededor de 50 microsegundos y se disipa completamente en un tiempo aproximado de 100 a 200 microsegundos. este tipo de onda se ilustra en la figura 3.9.

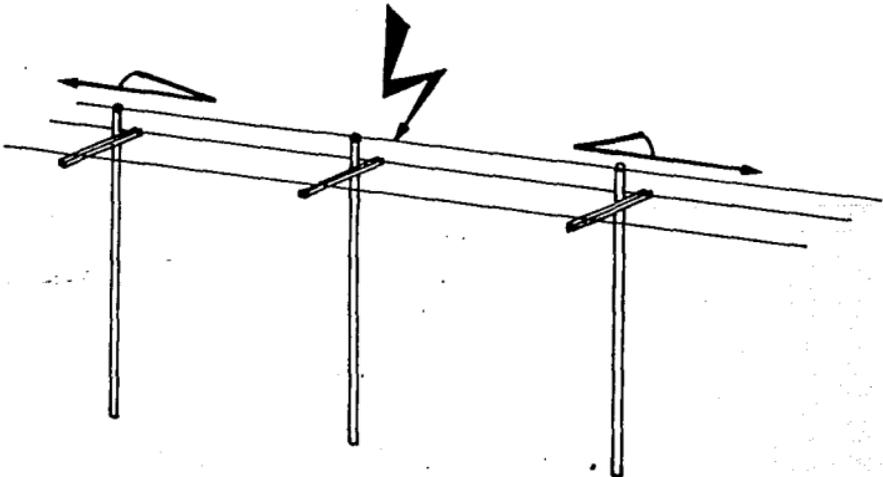


Figura 3.8.-Ondas viajeras en la línea.

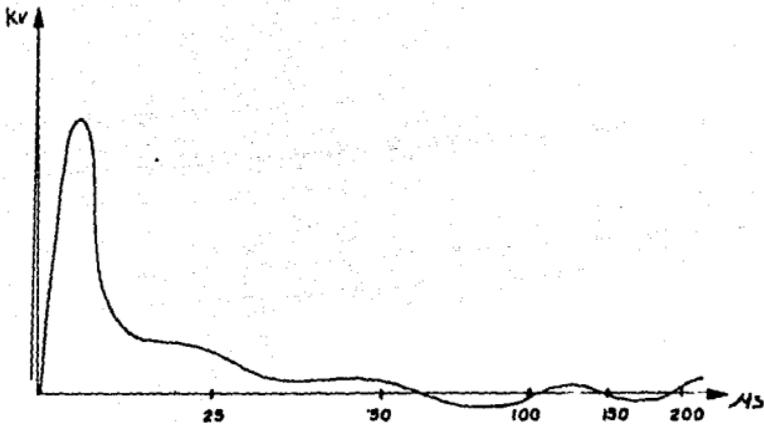


Figura 3.2.-Onda de sobretensión típica.

# **CAPITULO 4**

**APARTARRAYOS,  
HILO DE GUARDA Y  
REDES DE TIERRA**

#### 4.1 APARTARRAYOS.

Uno de los problemas que afectan comúnmente a los sistemas de distribución de energía eléctrica ocurre cuando se produce algún disturbio que provoca la generación de una sobretensión, como ya se mencionó en capítulos anteriores.

Una vez que se ha presentado el problema, se requiere que las considerables cantidades de energía que pueden ocasionar grandes daños a los equipos conectados al circuito e incluso a la misma líneas, sean controladas y disipadas en el menor tiempo posible.

Este es el papel que desempeñan los apartarayos en los sistemas de distribución, y es por esto que es importante el estudio de sus características y uso.

Los primeros apartarayos consistían en una distancia en aire entre dos electrodos esféricos. La incidencia de una sobretensión provocaba la ionización del aire y se establecía un arco eléctrico que permitía a la onda de sobrecorriente ser conducida a tierra. Estos dispositivos tienen la desventaja de permitir fluir a la corriente de corto circuito continuamente a tierra una vez que el arco se hubiese establecido. Eléctricamente hablando su protección es lenta y su respuesta depende en mucho de la forma de onda de la sobre tensión aplicada. El arco no se produce hasta que una porción considerable de la onda de frente escarpado ha sido aplicada al equipo protegido, además estos espacios son de poca longitud, dando como resultado de estos frecuentes arcos en disturbios de baja frecuencia.

En contraste, los modernos apartarayos (o pararrayos) son dispositivos eléctricos cuya característica de impedancia varía de forma

no lineal con el aumento de la tensión aplicada entre sus terminales o bornes.

Las características principales que como dispositivos de protección deben de cumplir son tres:

- Cuando las condiciones de tensión en el circuito protegido sean normales y no excedan en magnitud a un cierto valor determinado, su impedancia deberá ser alta y comportarse como un aislador.
- Al momento de ocurrir una sobretensión que rebase dicho valor en el circuito, entonces su impedancia deberá disminuir considerablemente para ofrecer una trayectoria de baja impedancia que permita conducir a tierra la onda de sobrecorriente provocada.
- Una vez desaparecida la sobretensión y después de que las condiciones de tensión regrese a la normalidad, el dispositivo deberá recobrar su característica de alta impedancia e interrumpir el paso de la corriente a través de él para volver a comportarse como un aislador.

En la actualidad se utilizan básicamente dos tipos de apartarrayos, los de tipo autovalvular y más recientemente, los de óxido de Zinc.

#### 4.1.1 Apartarrayos autovalvulares.

Hasta hace algunos años era el tipo más comunmente utilizado en los en los sistemas de distribución. Básicamente se componen por un cuerpo cilíndrico de porcelana aislante herméticamente sellado que permite su instalación a la intemperie, en cuyo interior se encuentran contenidos los elementos valvulares, que son discos montados en serie, de dimensiones apropiadas a la capacidad y tensión del apartarrayos, fabricados a base de una mezcla de Carburo de Silicio y un aglutinante que permite cierto contacto entre las partículas de Carburo de Silicio, con propiedades semiconductoras,

moldeados a presión y cocidos para darles la consistencia necesaria. Estos discos se encuentran a su vez conectados en serie con los espacios explosores, que son los que aíslan a los elementos resistivos del circuito al que se encuentre conectado el apartarrayos, proporcionando los valores definidos de tensión con los que comienza y termina la operación del mismo.

#### 4.1.1.1 Funcionamiento de los apartarrayos autovalvulares.

La figura 4.1 muestra el efecto de una onda de sobre tensión que incide en un apartarrayos autovalvular en relación con las características de operación de este.

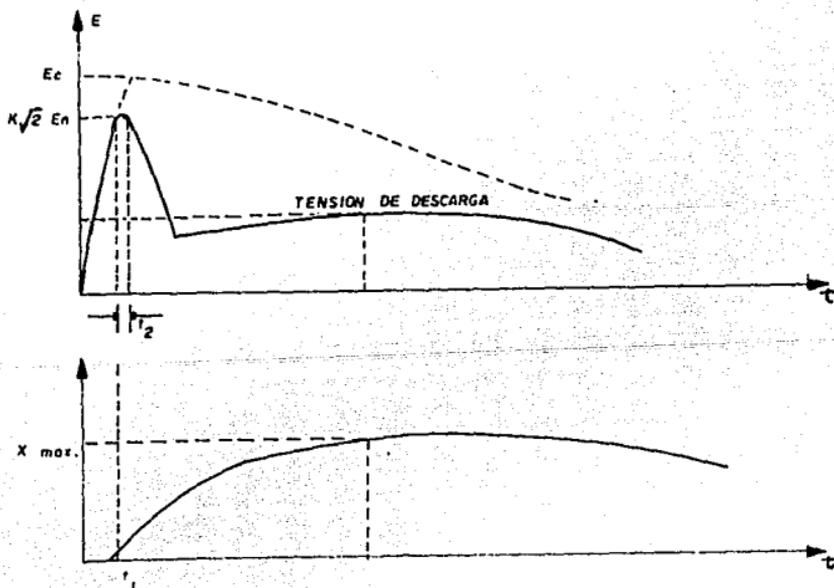


Figura 4.1.-Gráfica del comportamiento del apartarrayos autovalvular.

La onda de sobretensión normalizada que se utiliza para emular el efecto de una descarga atmosférica tiene una magnitud máxima de tensión  $E_c$ , llamada también amplitud de cresta de la onda, cuyo frente escarpado tiene una duración de  $1.2 \mu s$ , para después decrecer su magnitud hasta un valor de  $0.5 E_c$  en un tiempo total de  $50 \mu s$ .

Al iniciarse la onda y conforme a la calibración de los espacios explosores, transcurre un tiempo  $t_1$  llamado tiempo de retardo del explosor, mientras el aire entre los electrodos se ioniza y se empieza a formar el arco eléctrico a través de los electrodos de los explosores.

La tensión inicial de arqueo  $E_1$  se relaciona con el valor pico de la tensión nominal de operación de la línea  $E_n$ , es decir  $V \sqrt{2} E_n$ , por medio del coeficiente  $K$ , que depende de las características del diseño y fabricación del apartarrayos.

Hasta que la resistencia variable comienza a descargar la energía inducida, transcurre un tiempo  $t_2$  de retardo debido a la resistencia de arco, durante el cual la tensión alcanza un valor mayor que  $K V \sqrt{2} E_n$ , conocida como tensión de arqueo del apartarrayos, después desciende rápidamente hasta llegar al valor correspondiente a la tensión de descarga.

Durante la operación del apartarrayos circula por la resistencia la corriente de descarga que alcanza su valor máximo  $I_{\max}$  en el mismo instante en que la tensión alcanza el valor de descarga, conservando un valor superior a  $0.5 I_{\max}$  durante el tiempo normalizado de  $50 \mu s$ , caracterizando la capacidad conductiva del apartarrayos.

Con respecto al valor óptimo de la constante  $k$  para la tensión de arqueo, se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) La tensión de arqueo deberá ser considerablemente reducida con respecto al valor de la amplitud de cresta de la onda de tensión, es

decir, no debe ser mayor a 2.4 y mediante el uso de varios explosores en serie se consigue que el arco se extinga para un valor de 1.2 En., que es un valor aceptable.

b) Por otro lado no es conveniente que el valor de k sea menor que 2.4, ya que las resistencias variables permiten la circulación de varios miles de amperes sólo durante un tiempo del orden de 50 $\mu$ s, y dado que algunas sobre tensiones de origen interno llegan a alcanzar amplitudes cercanas a  $2\sqrt{2}$  En y su duración es de más o menos 10 ms, si se permitiera la operación de los apartarrayos para este tipo de ondas, la capacidad térmica de las resistencias no sería suficientemente alta como para soportarlas.

Por tales motivos y para contar con un margen de seguridad, se recomienda usar un valor de  $K=2.4$ .

En lo tocante a las resistencias variables, estas deberán ser capaces de resistir, aparte de las descargas de gran intensidad y poca duración, otro tipo de menor magnitud pero de larga duración en su derivación a la tierra, además para que puedan limitar las sobre tensiones originadas por las maniobras y fallas a tierra, los explosores están dotados de un soplado magnético que se encarga de extinguir rápidamente el arco formado, proporcionando una mayor resistencia a los rearqueos.

Por lo expuesto anteriormente, la importancia primordial de la característica de impedancia no lineal de los elementos valvulares reside en su propiedad de limitar la tensión que aparece entre las terminales del apartarrayos en el periodo de la descarga, así como interrumpir la corriente de frecuencia nominal que también circula durante este mismo periodo.

Esta característica se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$i = KE^n$$

DONDE:

i-Es la corriente que circula por el elemento valvular.

E-Es la tensión aplicada en las terminales.

K-Es una constante relacionada a la construcción y diseño del elemento valvular.

n-Tiene valores entre 4 y 8 en el caso de elementos de carburo de Silicio.

#### 4.1.2 Apartarrayos de Oxido de Zinc.

Recientemente se ha encontrado que la característica de impedancia en los elementos valvulares fabricados a base de óxidos metálicos ofrecen propiedades de no linealidad mayores que en el caso de los elementos convencionales usados en los apartarrayos autovalvulares. Es por eso que durante los últimos años los fabricantes de estos dispositivos han fijado su atención en las curvas tensión-corriente de los elementos de Oxido de Zinc, obteniendo ventajas sobre el diseño convencional, dado que en este tipo de apartarrayos no es necesaria la conexión en serie con espacios explosores ya que en condiciones normales de operación del circuito, por el elemento valvular circula una corriente pequeña, del orden de un 1mA, permitiendo la circulación de las ondas provocadas por la sobretensiones cuando la tensión sobrepasa el valor determinado, esto representa una simplificación en el proceso de fabricación y en la característica de operación desaparece la tensión de arqueado además de que soportan un mayor número de operaciones y sus dimensiones son reducidas comparándolos con los del tipo autovalvular.

Del mismo modo que en el caso de los elementos valvulares de Carburo de Silicio, la relación tensión-corriente de este tipo de elementos se puede caracterizar por la relación:

$$i = KE^n$$

Solo que en este caso el valor de n se encuentra entre 25 y 40.

#### 4.1.3 Cuerno descargador de arco y limitador de corriente.

NGK de Japón desarrollo recientemente un novedoso medio de protección de líneas de distribución contra sobretensiones atmosféricas y lo ha llamado Cuerno Descargador de Arco y Limitador de Corriente (CLAH, por sus siglas en inglés : Current Limiting Arcing Horn), el cual esta basado en la combinación de un entrehierro en serie con un limitador de corriente a base de Oxido de Zinc, conectado a través de cada aislador como se muestra en el dibujo de la figura 4.2.

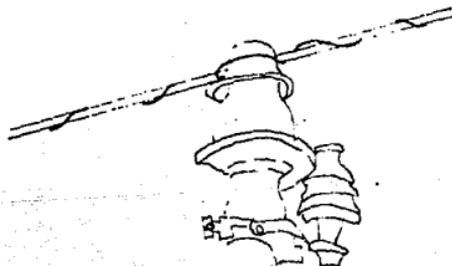


Figura 4.2.-Dibujo de cuerno descargador de arco y limitador de corriente de falla.

Este dispositivo está diseñado de tal forma que el flameo o rompimiento del entrehierro, producto de una sobretensión ocurre siempre entre el conductor y el anillo colocado alrededor del aislador y conectado a la parte superior del elemento limitador de corriente.

Las características tensión-tiempo tanto del aislador como del entrehierro en el CLAH se muestran en la figura 4.3.

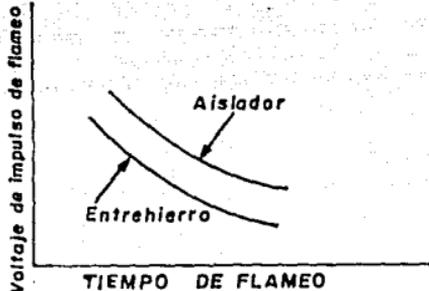


Figura 4.3.- Curvas E-T del aislador y del entrehierro en el CLAH.

La figura 4.4 describe esquemáticamente las tensiones en diversos puntos y la corriente a través del elemento limitador, las características tensión-corriente del entrehierro, del limitador de corriente y la combinación de ambas y finalmente el proceso de como ocurre la excitación de corriente producida por la tensión transitoria. Obsérvese que en el momento en que la tensión transitoria se ha disipado, se alcanza el punto más bajo de las característica E-I del CLAH, que es la tensión mínima requerida para sostener el arco en el entrehierro. Sin embargo en ese instante la tensión senoidal sigue creciendo, por lo que el arco no se extingue y comienza a conducir corriente de frecuencia del sistema, la cual es interrumpida cuando la corriente vuelve a pasar por el punto  $I_0$  en la característica E-I, y dado que después de este instante la tensión en el sistema va decreméntándose, el arco a través del entrehierro y consiguientemente la corriente de 60 Hz se interrumpen.

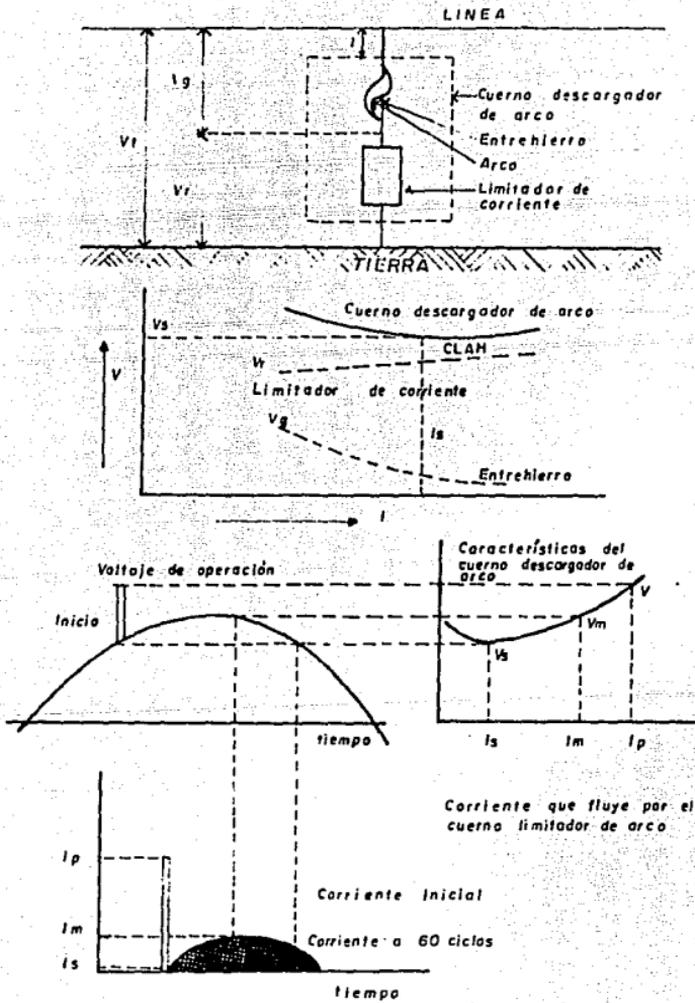


Figura 4.4.-Características de operación del CLAH.

#### 4.1.4 Consideraciones acerca de los tipos de apartarrayos.

Comparando con el tipo autovalvular, con el elemento valvulares de Carburo de Silicio, el tipo de Oxido de Zinc ofrece las siguientes características sobresalientes:

En la curva característica tensión-corriente de los tipos de elementos valvulares, se aprecia que para el caso del oxido de Zinc estos ofrecen una excelente respuesta plana a través del rango comprendido desde  $10^{-3}$  hasta  $10^4$  amperes, la cual es mejor que los elementos de carburo de Silicio; estas características se ilustran en la figura 4.5:

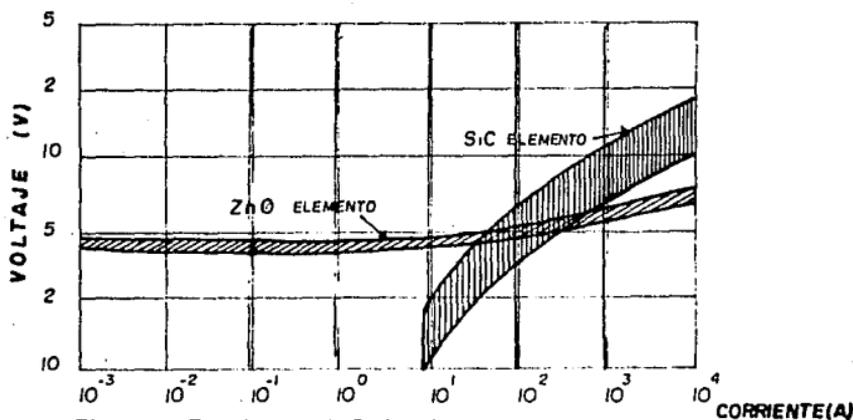


Figura 4.5.- Curvas E-I de elementos de ZnO y SiC.

Como resultado de las investigaciones continuas para la producción en masa, que se han llevado a cabo durante los últimos años, se ha verificado que la dispersión en la curva característica de los elementos de Oxido de Zinc es pequeña, inferior a la quinta parte de los elementos de Carburo de Silicio, por lo que se asegura que la calidad de los productos es completamente estable.

En la figura 4.6 se muestran curvas características, en donde para corrientes del orden de 2.5 kA y mayores, se obtienen valores de tensión aplicados mayores de 80 kV, dependiendo el tipo de elemento. Sin embargo, para tensiones del orden de 24.5 kV y para temperatura normales de operación se obtiene valores de corriente del orden de 1 mA, para el tipo convencional éstas son el orden de 900 A a 25°C, por esta razón es que se pueden fabricar apartarrayos de Oxido de Zinc sin espacios explosores conectadas en serie.

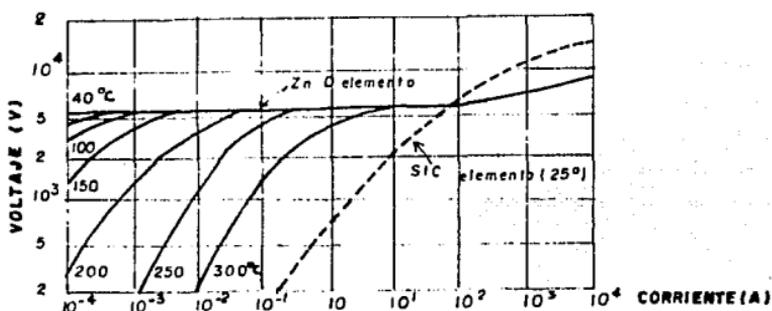


Figura 4.6.-Curvas características E-I de los dos tipos de elementos, con características térmicas.

Esto significa que los apartarrayos de Oxido de Zinc son capaces de soportar continuamente la tensión nominal del sistema, mientras que los apartarrayos convencionales, debido a la necesaria presencia de los espacios explosores, se conectan a la línea sólo cuando ocurre una sobre tensión transitoria que produzca el arqueo de estos espacios explosores. Debido a la característica de alta no-linealidad, el apartarrayos de Oxido de Zinc presenta una conducción inmediata de corriente como resultado de cualquier aumento, por leve que sea, de la tensión por arriba de su valor nominal. El apartarrayos convencional, en cambio, debe esperar a que operen los espacios explosores para empezar a conducir corriente a tierra. Este efecto es particularmente

desventajoso en el caso de tensiones inducidas caracterizadas por pendientes muy escarpadas en el frente de onda, en este caso la tensión de descarga puede ser considerablemente más grande.

En la figura 4.7 ilustra la diferencia entre las características de operación de dos tipos de apartarrayos. La forma de onda de tensión de los del tipo de Oxido de Zinc es una curva suave y puede ser expresada como sigue:

$$V = Z_0 e(t) - Z_0 I$$

Donde:

$Z_0$  es la impedancia a la sobretensión de la línea.

$I$  es la corriente instantánea que circula por el apartarrayos.

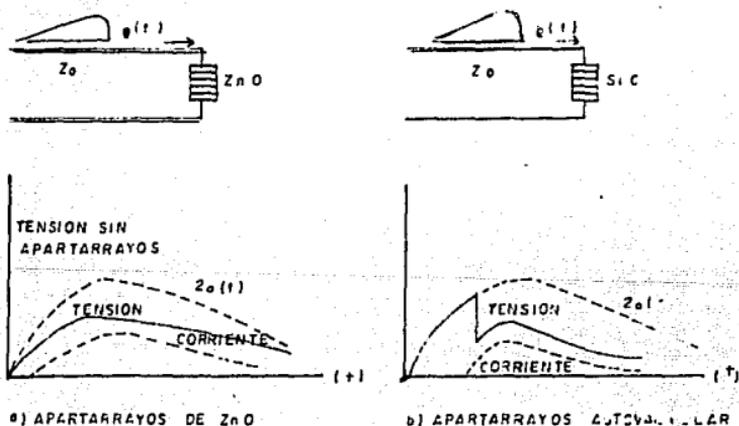


Figura 4.7.- Características de operación de los dos tipos de apartarrayos.

La forma de onda de tensión en un apartarrayos autovalvular tiene un pico en el instante en que se flamean los espacios explosores, después de esto, la tensión puede ser expresada usando la ecuación anterior.

Como se aprecia en la Figura 4.7, la característica de protección de un apartarrayos autovalvular, está dada por las tensiones de flameo y descarga. Sin embargo la característica de protección de un apartarrayos de Oxido de Zinc está dada solamente por la tensión de descarga definida por su característica de operación.

En el caso de tipo autovalvular, la tensión de flameo, o mejor dicho, la característica E-I de los espacios explosores, es básica para el cálculo y determinación del nivel de protección y la coordinación de aislamiento, entonces con la eliminación de los espacios explosores ¿Cómo se determina el margen de protección de un apartarrayos del tipo Oxido de Zinc en el proceso de coordinación de aislamiento?

El margen de protección en este caso, será determinado por la tensión máxima de descarga que se presente en condiciones normales de operación. Sin embargo es difícil dar una expresión bien definida, por lo que la forma de onda de la tensión debe ser considerada individualmente para lograr una discusión precisa de la coordinación de aislamiento.

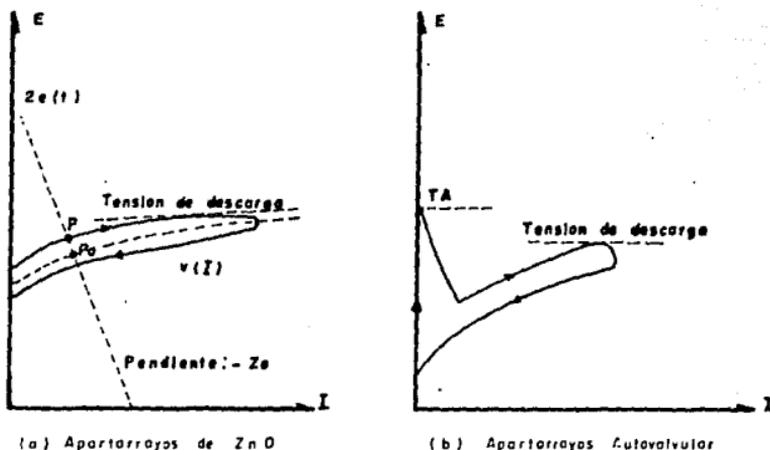
Para una burda estimación de esta forma de onda, es conveniente asumir una relación funcional fija entre la tensión y la corriente en un apartarrayos de Oxido de Zinc:

$$V = v(I)$$

Relacionando esta ecuación con la anterior, la forma de onda de tensión o la dependencia de la misma con respecto al tiempo puede ser calculada. Un método gráfico para resolver las ecuaciones se muestra en la figura 4.8(a). A saber, los valores de la tensión y corriente

correspondientes a  $e(t)$  están representadas por  $P_0$ , el punto de intersección de las dos curvas correspondientes a las ecuaciones anteriores. Para un tratado simple, el punto  $P_0$  se mueve sobre la curva  $v(I)$  representada por la línea punteada en la figura 4.8(a). Sin embargo, el punto E-I real se mueve a lo largo de la línea continua que se conforma de dos trayectorias diferentes que no pueden ser contenidas en una sola línea.

Una característica E-I de un apartarrayos convencional es mostrada conceptualmente en la figura 4.8 (b) con fines comparativos. El cambio desde la tensión de arqueo (TA) a una tensión de descarga más baja es abrupto. Aunque es una característica típica de los apartarrayos convencionales, cambiará para el caso de transitorios más drásticos causados por incendio de los espacios explosores, particularmente en el caso de sobretensiones con frente de onda escarpado.



(a) Apartarrayos de ZnO

(b) Apartarrayos Autovalvular

Figura 4.8. - trayectoria transitorias E-I de los dos tipos de apartarrayos.

Otra característica sobresaliente de los elementos de Oxido de Zinc es que su respuesta al paso de impulsos de corriente es superior a la de los elementos convencionales, dado que la tensión de descarga es influenciada por la duración del frente de onda de corriente aplicada, aún para el mismo valor de corriente. Como se puede observar en la figura 4.9, la duración de la onda de corriente normalizada es de 8  $\mu$ s, en el caso en que la duración del frente de onda es de 1  $\mu$ s, la razón de elevación de tensión del Oxido de Zinc es menor que la del Carburo de Silicio. Esto hace que las características protectivas del Oxido de Zinc sean mejores que las del Carburo de Silicio contra sobrecorrientes con frente de onda de corta duración.

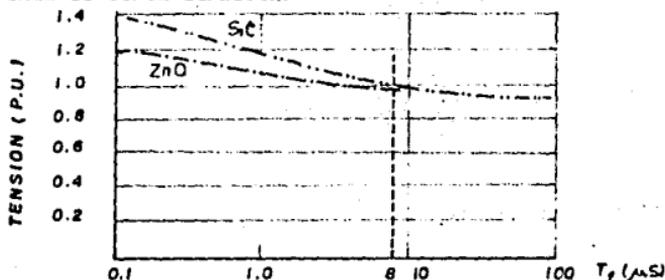


Figura 4.9. -Tensión de descarga característica para diferentes duraciones de frente de onda de corriente de descarga de 10 KA.

Por otro lado, la estabilidad de la curva E-I. de los elementos de Oxido de Zinc es muy buena después del paso de una corriente de gran magnitud. Cuando una onda de corriente de 100 KA y de  $4 \times 10 \mu$ s es aplicada dos veces por un elemento valvular de Carburo de Silicio con un diámetro de 90 mm. y se mide la tensión de descarga a 10 KA, el valor obtenido es del 10% mayor que el valor original, esto representa un cambio en las características del elemento en el caso de un elemento de Oxido de Zinc, sin embargo, el cambio en la tensión de descarga a 10 KA es menor del 3% después de que se le aplicaran dos ondas de 100 KA y 4 x

10  $\mu$ s, a pesar de que el área transversal es menor que la mitad de la del Carburo de Silicio. Tal valor es contenido en un rango que puede ser considerado como un error de medición. La estabilidad de los elementos de Oxido de Zinc es excelente y la variación en las características puede ser considerada nula en la práctica.

Otra característica importantes de los dos tipos de apartarrayos se ilustra en la figura 4.10. Esta consiste en la interrupción de la corriente de frecuencia nominal una vez que se ha disipado a tierra la corriente asociada a la elevación transitoria de tensión.

En el apartarrayos convencional se realiza dicha interrupción como resultado de la desionización de los espacios explosores por medio de mecanismos de soplado magnético, o en el instante que la corriente tiene su primer paso por cero después del transitorio. En el apartarrayos de Oxido de Zinc no hay la necesidad de desionizar espacios explosores, ya que no existen, y debido a las excelentes características de no linealidad del material, la corriente es limitada a la corriente de fuga tan pronto como la tensión regresa a su valor nominal.

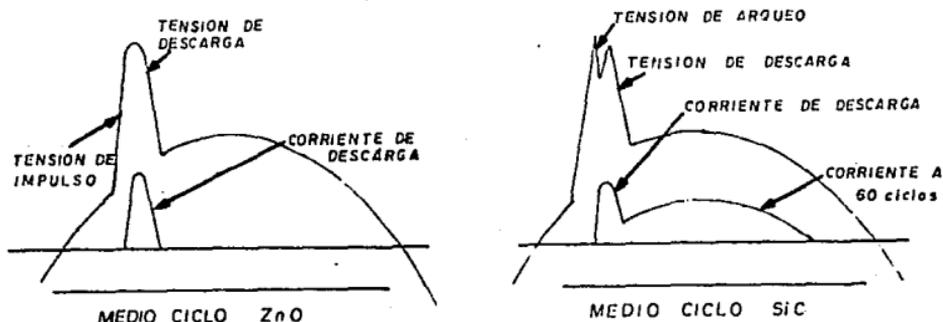


Figura 4.10.- Interrupción de corriente de frecuencia nominal del sistema en los dos tipos de apartarrayos.

La capacidad para disipar energía de los apartarrayos de Oxido de Zinc depende meramente de la capacidad de sus elementos valvulares, dado que no cuentan con elementos explosores. Comparados con los apartarrayos convencionales, la corriente de frecuencia nominal que debe disipar este tipo de apartarrayos es considerablemente pequeña, por lo tanto, en uso práctico, sólo se toman en consideración la energía que debe ser disipada debido a la insidencia de las sobretensiones. En el caso del tipo autovalvular, se debe de tomar en cuenta el consumo permisible de la energía de los espacios explosores. Por tanto, la capacidad de resistir el paso de la corriente de descarga deberá ser verificada solamente para cada elemento valvular de Oxido de Zinc. Y el número requerido de elementos pueden ser conectados en paralelo para lograr una determinada capacidad de disipación de energía, o bien, la cantidad necesaria de apartarrayos que se podrán conectar en paralelo en un mismo punto para brindar la debida protección.

Finalmente, en relación al efecto que puede tener la contaminación en la superficie del apartarrayos que puede comentarse los siguiente:

Bajo condiciones de contaminación se forman las llamadas "Bandas Secas" En la superficie de la porcelana del apartarrayos. Este efecto produce distorsiones del gradiente de tensión que afecta los espacios explosores y la porcelana. Algunos espacios explosores pueden, en tales condiciones, resultar expuestos a esfuerzos superiores a los de las condiciones de diseño, que los lleven a operar indeseablemente y en el peor de los casos en forma continua produciendo la falla del apartarrayos.

Este problema se minimiza, pero no se elimina, utilizando circuitos de graduación colocados a través de los espacios explosores (carregio de resistencias o capacitores) para reducir los efectos de la distorsión del gradiente de tensión.

Los apartarrayos de Oxido de Zinc están libres de este problema y por tanto de las fallas asociadas con la contaminación.

#### 4.1.5 Clasificación de los apartarrayos.

Las tres diferentes clases de apartarrayos están designadas en las normas ANSI C-62.1-1981 como las siguientes:

**Clase Distribución.** - Están diseñados y producidos específicamente para proteger a los equipos de los sistemas de distribución contra sobretensiones que se pudieran presentar en los mismos. Generalmente se instalan en la parte superior de los postes en donde se encuentran los transformadores de distribución. Por sus características, la aplicación de esta clase de apartarrayos es la más común, y exceden en número a las otras clases.

Los valores de las tensiones nominales de estos dispositivos van desde 3 KV y en múltiplos de éste hasta llegar a los 36 KV.

**Clase Intermedia.** - Proporcionan substancialmente mejores características de protección y durabilidad que la de clase anterior y cuentan con muchas de las características de la clase estación, que son más costosos. El apartarrayos intermedio representa la solución al mejoramiento de los márgenes de protección contra las sobretensiones dentro de límites económicos razonables.

La aplicación de esta clase de apartarrayos es muy amplia, incluyendo instalaciones industriales y comerciales y centros de carga subterráneos. Son especialmente indicados para el caso de acometidas aéreo-subterráneas, donde la inversión extra se justifica para aumentar la confiabilidad del servicio a centros comerciales, de finanzas, hospitales, estaciones de radio y T.V., complejos habitacionales e instalaciones deportivas.

Clase Estación.-Conforme al crecimiento de los sistemas de transmisión de alta tensión y la tendencia generalizada a los niveles de aislamiento reducido, las extensivas adiciones de bancos de capacitores de potencia y circuitos de cable subterráneo de potencia, se han venido satisfaciendo los requerimientos para el incremento de la confiabilidad y duración de los dispositivos de protección contra sobretensiones. La alta calidad de los apartarrayos de clase estación representa el diseño y las técnicas de aplicación más avanzados disponibles. Sus excelentes características de respuesta consistente se extienden desde el caso de una onda de frente escarpado inducida por una descarga atmosférica, hasta las de lenta elevación provocadas por la operación de interruptores, e incluyen también altas capacidades para conducir las ondas de sobrecorriente que se descargan a tierra.

Esta clase de apartarrayos se producen para valores de tensión, desde 3KV hasta la tensión requerida más alta, para tensiones por debajo de 60KV su fabricación es de columna única, pero apartir de este valor se modifica su estructura y se fabrican en columnas múltiples con la finalidad de mantener en línea su altura con los demás equipos de subestaciones.

#### 4.1.8. Coordinación de aislamiento.

La coordinación de aislamientos en un sistema eléctrico se define según la norma ANSI C.62.1-1982, como el proceso de correlacionar la resistencia del aislamiento del equipo eléctrico con las sobretensiones esperados y con características de los dispositivos de protección contra sobretensiones.

La información acerca de las características del aislamiento de los equipos a proteger contra las sobretensiones se logra mediante el Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (NBI, BIL por sus siglas en Inglés) de dichos equipos, debiéndose tomar en cuenta también el tipo de sistema, la conexión a tierra, la tensión y el tipo de equipo considerados.

4.1.5.1. Nivel básico de aislamiento en sistemas de distribución.

El nivel de aislamiento de un sistema eléctrico se define como la capacidad con que los aislamientos de los equipos que lo componen cuentan para soportar los esfuerzos originados por la presencia de tensiones transitorias y de frecuencia nominal que les son aplicados.

Los aislamientos se someten a 4 diferentes tipos de esfuerzos eléctricos, cada uno de ellos contemplan un determinado rango de tiempo y magnitud de tensión aplicada, esto es:

- Tensión aplicada constantemente al equipo durante su operación
- Sobretensión del orden de 1.4 en P.U. de frecuencia nominal, para sistemas con neutro sólidamente aterrizado, con duración de 10 ms a 2 seg. originadas por fallas a tierra.
- Sobretensiones transitorias de magnitud menor a 2.5 en P.U., originadas por la operación de interruptores, con duración de 100  $\mu$ s a 100 ms.
- Sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, con niveles de tensión de alrededor de 2.5 P.U., mas el efecto de corta duración debido a las ondas viajeras que se provocan durante la operación del apartarrayo, entre el punto de conexión de este y el equipo protegido, con duración menor a 3  $\mu$ s.

El nivel básico de aislamiento al impulso de un equipo se determina en función a la tensión nominal para la cual se ha diseñado, y representa la resistencia que el aislamiento presenta a las sobretensiones que pudieran ser aplicadas.

Para un mismo nivel de tensión nominal de un sistema dado, se pueden tener diferentes niveles de aislamiento, esto depende de las características y clase de aterrizamiento que se empleen.

La determinación del NBI en un sistema eléctrico, está en función de consideraciones técnico-económicas, debiendo ser de un valor lo más reducido posible, siempre y cuando permita obtener una buena protección ante las sobretensiones.

En el caso de una línea de distribución, el aislamiento debe ser lo suficientemente confiable en su operación ante las diferentes condiciones atmosféricas que se presenten, sin embargo es antieconómica diseñar un sistema que sea inmune a las interrupciones originadas por fallas de aislamiento ante las sobretensiones esta cuestión debe ser resuelta en base a estudios que proporcionen un balance entre confiabilidad y el costo.

Este problema se complica debido a la influencia de muchas variables, ya que la forma de la onda de sobretensión y su amplitud originarán, diferentes tipos de esfuerzos en el aislamiento.

La presencia de tensiones transitorias en un sistema eléctrico, es un fenómeno probabilístico, donde las sobretensiones de gran magnitud tendrán menor probabilidad de ocurrencia, por lo que se permite correr el riesgo de que al presentarse originen una falla de aislamiento, pero con consecuencias controladas.

El nivel de aislamiento de un sistema de distribución queda definido fundamentalmente por los esfuerzos a que son sometidos los aislamientos por la incidencia de sobretensiones de origen atmosférico. Cuando se ha diseñado el aislamiento con esta base, la resistencia ante sobretensiones de frecuencia nominal y por maniobra de interruptores queda normalmente resuelta.

En los sistemas de distribución se presentan fallas debidas al flameo de los aislamientos externos provocadas por condiciones específicas de humedad y contaminación del medio ambiente y las superficies de los aisladores. En regiones costeras, el depósito de sal origina una severa contaminación en el aislamiento originando una disminución de su resistencia al combinarse con la humedad.

La forma de determinar el NBI de los aislamientos de los equipos, es someterlos a impulsos de tensión de forma de onda normalizada ( $1.2 \times 50 \mu s$ ) de diferente amplitud de cresta, este procedimiento es conocido como prueba de onda completa, y existe otra llamada onda cortada, de  $3 \mu s$  de duración y de amplitud de onda mayores que las empleadas en la anterior, esta prueba es comúnmente aplicada a transformadores.

#### 4.1.6.2. Clasificación de los sistemas eléctricos.

De acuerdo con la conexión a tierra del neutro del sistema y de las sobretensiones que se presentan entre fallas de fase a tierra, se tiene las siguientes clasificación.

-Sistema Clase A. Los sistemas de este tipo son trifásicos de cuatro hilos, multiterrizados a lo largo del circuito.

Sistemas Clase B. Sistemas sólidamente aterrizados, en los que  $X_0/X_1 < 3$  y  $R_0/X_1 < 1$ .

-Sistema Clase C. Sistemas con neutro aterrizado, en los que no se cumplen las relaciones de los sistemas clase B. Emplean generalmente impedancias conectadas del neutro a tierra para disminuir la magnitud de las corrientes de corto circuito monofásico. Los sistemas que tienen neutralizadores de fallas de fase a tierra se incluyen en esta categoría.

-Sistemas Clase D. Sistemas con neutro aislado en los que  $X_0/X_1$  tiene valores entre -40 a  $-\infty$

-Sistemas Clase E. Sistemas con neutro aislado en los que  $X_0/X_1$  tiene valores entre 0 y - 40.

En la tabla 4.1 se presentan estos valores así como los coeficientes de aterrizamiento correspondientes. Este coeficiente se define como la relación de la tensión máxima de fase a tierra, en el punto de localización del apartarrayos durante una falla en cualquier punto del sistema, con la tensión entre fases nominal del sistema.

El coeficiente de aterrizamiento del sistema multiplicado por la tensión entre fases será igual a la tensión nominal del pararrayos que deberá instalarse en el sistema, es decir:

$$V_n = C_a V_{e-\phi}$$

Donde:

$V_n$  = Tensión nominal del apartarrayos

$C_a$  = Coeficiente de aterrizamiento

$V_{e-\phi}$  = Tensión entre fases del sistema.

| CLASE | TIPO DE SISTEMA       | $X_0/X_1$       | $R_0/X_1$    | $C_a$    |
|-------|-----------------------|-----------------|--------------|----------|
| A     | MULTIATERRIZADO       | $\ll 3$         | $\ll 1$      | 0.7      |
| B     | ATERRIZADO FIRMEMENTE | $< 3$           | $< 1$        | 0.75-0.8 |
| C     | ATERRIZADO PARCIAL    | 3 a $\infty$    | 1 a $\infty$ | 1        |
| D     | NO ATERRIZADO         | -40 a $-\infty$ | -            | 1.1      |
| E     | NO ATERRIZADO         | 0 a -40         | -            | -        |

Tabla 4.1. -Clasificación de sistemas eléctricos.

El concepto básico de la coordinación de aislamiento se muestra en la figura 4.11; la curva A muestra la característica del aislamiento del equipo a proteger, de resistir los sobretensiones sin dañarse, y la curva B es el nivel de protección dado por la característica del dispositivo de protección. De tal suerte que cualquier aislamiento cuya característica de rigidez dieléctrica se encuentre por encima de la curva A, como por ejemplo la curva C, también se encuentra protegido por el dispositivo de protección de la curva B. Esto se cumple si se logra que la tensión de descarga de dicho dispositivo sea de un valor menor que el del valor de ruptura del aislamiento, para proporcionarle así la debida protección.

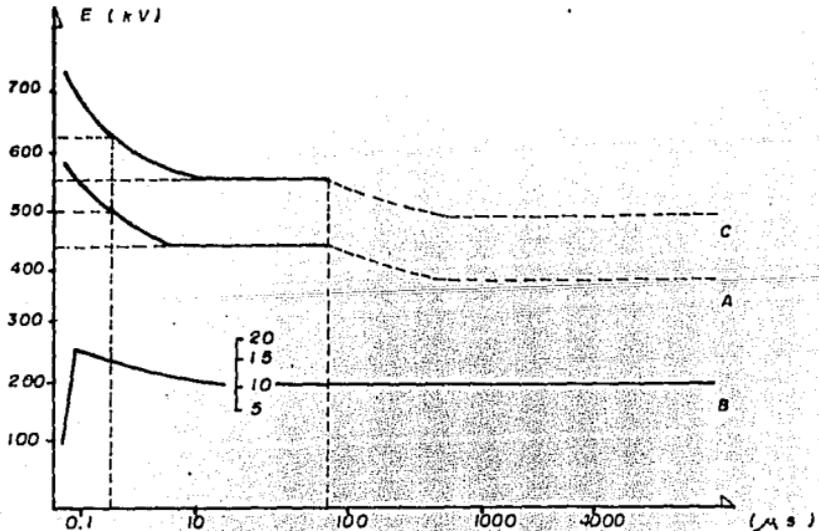


Figura 4.11. - Coordinación de aislamiento en un sistema eléctrico.

La forma de cuantificar la calidad de la protección lograda, está dada mediante el cálculo del Margen de Protección. Este margen es la relación que se da entre el nivel básico de aislamiento (NBI) y la tensión máxima de descarga del elemento de protección (TD) y está dada por la siguiente expresión:

$$\% MP = ((NBI - TD) / TD) \times 100$$

De acuerdo a la norma ANSI C62.2-4.4-1987, se acepta como adecuado un porcentaje mínimo de 20% .

#### 4.1.7. Método de selección de apartarrayos.

Para los cientos de aplicaciones que pueden tener los apartarrayos en los sistemas eléctricos, existe una secuencia de pasos lógicos que aparecen en la norma ANSI C62.2-1987, los cuales se deben consultar para conocer los detalles que permitan lograr este objetivo y son los siguientes:

1.- Determinar la tensión nominal del apartarrayos, mediante el cálculo de la tensión máxima de fase a neutro en el punto donde se instalará, utilizando el coeficiente de aterrizamiento para la clase de sistema de que se trate, o bien por método directo si se requiere de una mayor exactitud.

2.- Estimar la magnitud de la corriente de descarga y la forma de onda con base al nivel de aislamiento y la impedancia característica. Este valor se estima como de 20 KA. Máximos.

3.- Definir el nivel de aislamiento que se protegerá a partir de los niveles disponibles para la tensión del sistema bajo consideración.

4.- Comparar las características de las diferentes clases de apartarrayos, comenzando siempre por los de clase distribución.

5.- Preparar un diagrama de coordinación de aislamiento, calculando los márgenes de protección por frente de onda y tensión de descarga.

6.- Verificar que los márgenes de protección sean adecuados para las características del apartarrayos seleccionados.

7.- De ser necesario, incluir cualquier consideración especial acerca del tipo, clase y calidad del dispositivo en las especificaciones finales.

Las características de protección de los apartarrayos de distribución se determinan mediante la tensión de arqueo y la tensión de descarga. Para determinar si el equipo está adecuadamente protegido se deben efectuar las siguientes comparaciones:

a) La tensión de arqueo (TA) del apartarrayos incluyendo el margen de protección del 20% debe ser igual o menor que la resistencia a la tensión de onda cortada del equipo, la cual se considera de un valor del 115% del NBI para equipos con aislamientos en aire, aceite y aislamientos inorgánicos así como también, del mismo valor del NBI para el caso de aislamientos del tipo seco u orgánicos, según la norma ANSI C62.2-4.4-1987:

$$TA + 0.2 TA = 1.15 NBI$$

b) la tensión de descarga (TD), incluyendo un margen de protección de 20%, deberá ser menor o igual a la resistencia del nivel básico de aislamiento al impulso.

$$TD + 0.2 TD = NBI$$

4.1.7.1. Esquema de protección para transformadores de distribución en líneas aéreas.

La instalación y conexión de los apartarrayos es un aspecto muy importante para lograr una protección eficiente para estos equipos, de no ser esta adecuada, además de no proporcionar la protección debida, podrá incluso provocar fallas.

El método empleado por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro S.A. es el conocido como el de tres puntos; en este esquema, el borne de tierra de los apartarrayos se conecta al tanque del transformador y al neutro de baja tensión, como se ilustra en la figura 4.12.

Es importante también que los apartarrayos estén instalados lo más cerca posible al transformador, conectado su borne de alta tensión entre el cortacircuitos fusible y la línea, con el objeto de que cuando se presente una operación de los apartarrayos y éstos drenen la onda de sobrecorriente a tierra, los fusibles no operen, eliminando las interrupciones en el servicio, elevando la confiabilidad del mismo y minimizando los gastos en fusibles y maniobras de mantenimiento.

La tabla 4.2 muestra las distancias mínimas recomendadas de separación en la instalación de los apartarrayos.

| TENSIONES<br>NOMINALES<br>Kv | CLAROS MINIMOS RECOMENDADOS<br>mm |     |     |
|------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|
|                              | A                                 | B   | C   |
| 3                            | 203                               | 115 | 140 |
| 6                            | 230                               | 140 | 165 |
| 9                            | 250                               | 165 | 190 |
| 12                           | 280                               | 180 | 205 |
| 15                           | 315                               | 220 | 245 |
| 18                           | 355                               | 240 | 265 |
| 21                           | 380                               | 275 | 300 |
| 24                           | 410                               | 305 | 330 |
| 27                           | 470                               | 330 | 375 |
| 30                           | 500                               | 360 | 405 |
| 33                           | 530                               | 390 | 435 |
| 36                           | 560                               | 410 | 455 |

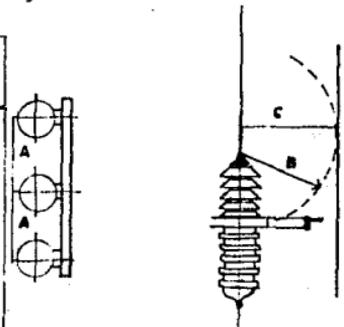


Tabla 4.2.- Claros mínimos recomendados para la insatallación de apartarrayos.

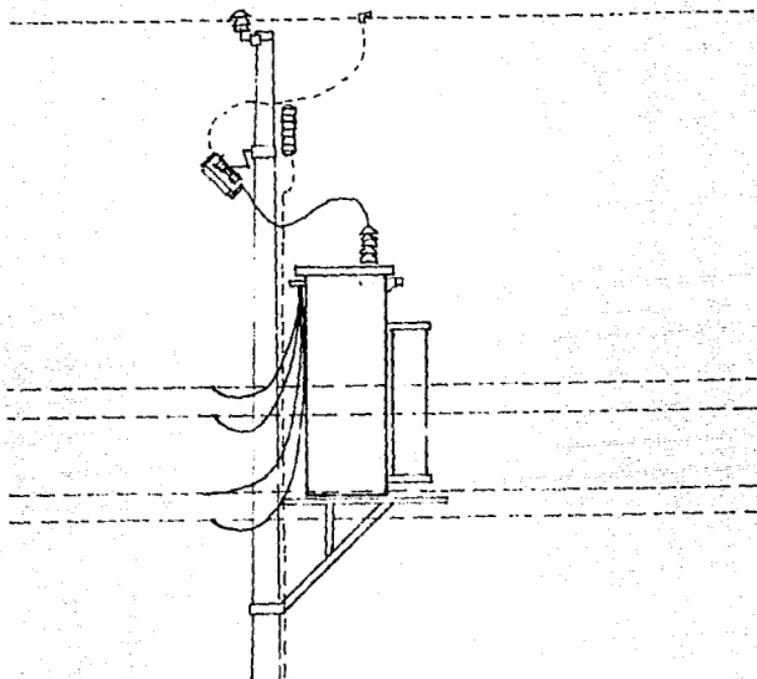


Figura 4.12. - Esquema de protección empleando el método de los tres puntos, normalizado en la CLYFCSA.

#### 4.1.7.2. Protección para circuitos de distribución subterránea.

La mayor parte de las instalaciones de distribución subterránea constan de ramales o circuitos relativamente cortos que reciben el suministro de energía de alimentadores de líneas aéreas. La práctica más común para proporcionar esta protección para este tipo de servicio, es

instalar un apartarrayos apropiado adyacente a la terminal del cable subterráneo en el poste de la acometida, y apartarrayos similar en la terminal del equipo a proteger en el extremo opuesto del cable, como se ilustra en la figura 4.13.

La conexión entre el borne a tierra del apartarrayos y el circuito de tierra, se debe conectar a la cubierta metálica del cable que a su vez debe estar perfectamente aterrizado, y el borne de conexión del apartarrayos a la línea debe conectarse perfectamente antes de los fusibles de protección de la acometida, para evitar que las corrientes de descarga pasen através de éstos durante una operación.

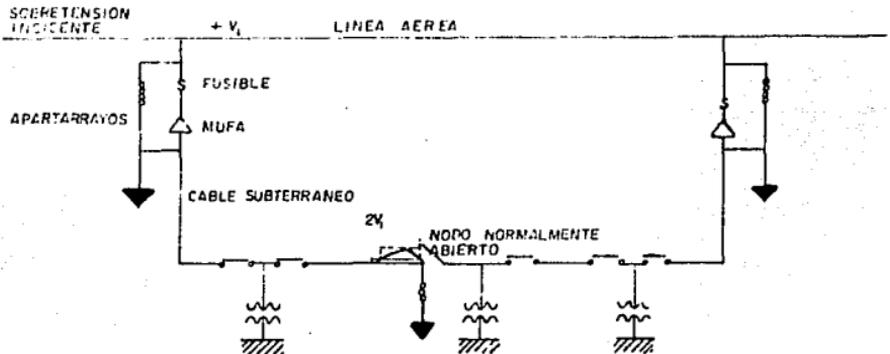


Figura 4.13.- Esquema de la protección contra sobretensiones en un sistema de distribución subterráneo con estructura en anillo.

Esta alternativa transfiere toda la responsabilidad de la protección contra sobretensiones al apartarrayos instalado en el poste de transición. Como las características de éste determinan los márgenes de protección aplicables a la instalación, es esencial que dentro del diseño de la protección se contemplen las condiciones de operación para este caso.

La función del apartarrayos que se instala en el poste de la acometida, es la de prevenir que las sobretensiones en la línea aérea dañen la conexión del cable, a este mismo y al equipo conectado. De acuerdo con la coordinación de aislamiento y con un apartarrayos de tensión nominal y clase apropiados, las sobretensiones se descargan en un nivel seguro por debajo del NBI de la instalación de cable, pero durante la operación introducen una onda viajera de tensión en el cable, la cual tiene dos componentes a considerar, como se aprecia en la figura 4.14:

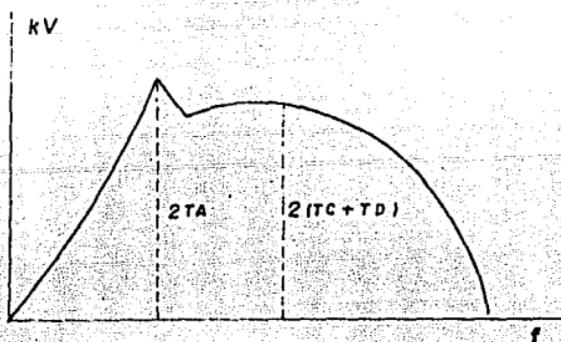


Figura 4.14.-Onda de sobretensión incidente en la instalación de cables subterráneos.

a) La tensión de arqueo en el apartarrayos (TA).

b) La tensión de descarga (TD), más la tensión proporcionada en el cable de conexión de apartarrayos a la línea aérea durante el paso de la corriente de descarga (TC), considerando un valor de 5.3 KV. por metro de cable empleado, según se recomienda en la Norma ANSI C62.2-4.5.1-1987.

Esta onda viajera recorre el cable a una velocidad aproximada de 150 m/μs y se reflejará positivamente si el extremo contrario del cable

presenta una impedancia elevada, tal como la de un transformador o la de un interruptor abierto, siendo la característica de la onda viajera la de que el valor de la tensión instantáneo se duplica durante la reflexión, y esta tensión la que pone en peligro al equipo conectado. En la figura 4.15 se muestra en forma gráfica este fenómeno.

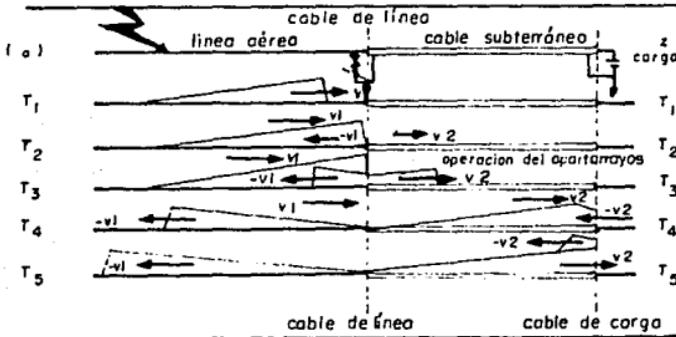


Figura 4.15.-Reflexión de la onda viajera en acometidas aéreo-subterráneas.

Ante esta situación, para diseñar la coordinación del aislamiento en este tipo de instalaciones, se consideran dos márgenes de protección; el primero se compara el nivel de aislamiento a onda cortada con la tensión de arqueado del apartarrayos, y en el segundo el NBI con la segunda componente de la onda viajera de sobretensión. Esto se ilustra en la figura 4.16.

Ahora bien, la localización de los apartarrayos es un factor importante a considerar una vez seleccionado el equipo, ya que tanto los cables de conexión del pararrayos a la línea del alimentador aéreo y a tierra, como la distancia entre los dispositivos y el equipo a proteger pueden reducir en forma considerable la efectividad de la protección. Para evitar esto, se recomienda mantener al mínimo el valor de la caída de tensión producida por estas conexiones utilizando la menor longitud de cable para efectuarlas.

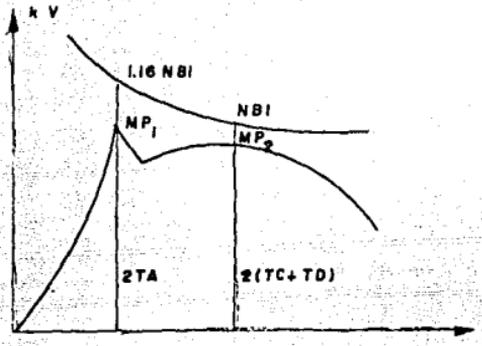


Figura 4.16.- Coordinación de aislamiento en acometida aéreo-subterránea.

$$MP_1 = [(1.15 \text{ NBI} - 2 \text{ TA}) / 2 \text{ TA}] \times 100$$

$$MP_2 = [(NBI - 2(TC+TD)) / 2 (TC+TD)] \times 100$$

#### 4.2 Hilo de Guarda.

Este tipo de protección tiene la finalidad de proveer de un blindaje contra las descargas atmosféricas que inciden en alimentadores primarios de distribución de energía eléctrica, esta es una práctica similar a la efectuada en el caso de líneas de transmisión de energía.

Este método consiste en insatlar un hilo conductor en la parte superior del poste, a una altura mayor que la del plano de las líneas de conductores de fase. Esta altura deberá ser tal, que de acuerdo a la experiencia obtenidas en líneas en servicio y con pruebas en modelos analógicos, deberá ser en un ángulo de protección de  $30^\circ$  a los conductores con respecto al eje vertical del hilo de guarda, como se muestra en la figura 4.17. Si los conductores de la línea se encuentran dentro de la zona de protección, se logra disminuir la probabilidad de que incida una descarga en un conductor de fase.

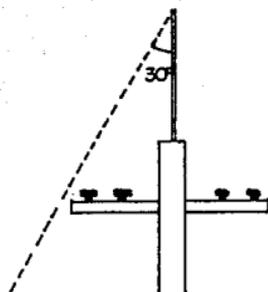


Figura 4.17.- Esquema de protección con hilo de guarda.

Un factor que es muy importante y que es necesario tomar en cuenta en esquemas de protección con hilo de guarda es el que la resistencia de la toma de tierra, debe de ser de un valor lo suficientemente bajo para limitar la tensión producida por la circulación de la corriente que se descarga a tierra durante la operación de esta protección a un valor inferior al nivel de aislamiento al impulso de la línea, ya que de no ser así, la elevación de la tensión en el hilo de guarda provocaría un flameo entre éste y los conductores de fase y se produciría una falla. La solución a este problema se logra mediante la instalación y conexión de electrodos de tierra repartidos uniformemente a lo largo de la línea, siendo recomendable la verificación periódica de los valores de sus resistencias.

#### 4.3. Redes de tierras.

Las redes de tierra constituyen una de las principales protecciones contra sobretensiones en los circuitos eléctricos, como plantas generadoras, transformadores, subestaciones, líneas de transmisión y distribución, etc. La red de tierras proporcionan un elemento de conexión a tierra para los neutros, los tanques y carcazas de los equipos, los apartarrayos, hilos de guarda y en general las partes que deban estar a potencial de tierra.

Los objetivos de las redes de tierra son: proporcionar la seguridad a las personas y demás seres vivos durante la circulación de corrientes a tierra, y la protección de los equipos evitando grandes daños e incendios.

Algunas características que las redes de tierra deben tener son: proveer un circuito de muy baja impedancia para la circulación de corrientes hacia tierra debidas a la operación de un apartarrayos, la conexión a tierra del neutro en sistemas con neutro aterrizado, asegurar que las partes metálicas de los equipos, que normalmente no conducen corriente, estén a potencial de tierra. También deberán disipar y resistir repetidamente las corrientes de falla y de choque por descargas atmosféricas, poseer resistencia a la corrosión en suelos de variada composición química, para asegurar un buen comportamiento continuo durante la vida útil del equipo a proteger, y tener buena resistencia mecánica para permitir su instalación con mínimo daño.

##### 4.3.1 Conexión a tierra de sistemas eléctricos.

Las diferentes formas de conexión a tierra del neutro de los sistemas eléctricos son:

- a) No aterrizado.
- b) Conexión efectiva a tierra.
- c) Conexión a través de una resistencia.

- d) Conexión a través de una reactancia.
- e) Conexión a través de un neutralizador.

A continuación se mencionarán algunas características importantes de cada uno de los métodos de aterrizamiento.

- a) No aterrizado.

En el pasado, algunos sistemas operaban con sus neutros no aterrizados, como se muestra en la figura 4.18. Los conductores de la línea forman capacitancias entre ellos y tierra, representadas por un grupo de capacitancias delta y estrella, donde las primeras son despreciadas por su influencia. En condición normal, las corrientes que circulan por cada rama son iguales y defasadas  $120^\circ$  una de otra. No hay diferencia de potencial entre los puntos neutros del equipo y el banco de capacitancias, por lo que el sistema está capacitivamente aterrizado. Si hay una falla a tierra en uno de los conductores, no habrá ninguna corriente que circule en la rama comprendida entre la fase fallada y tierra, debido a que no hay diferencia de potencial. Sin embargo, aumentará la tensión a través de las dos ramas acopladas capacitivamente, las cuales estarán  $80^\circ$  fuera de fase, y en consecuencia puede ocurrir un arco internamente en el punto de la falla, causando sobretensiones anormales y esfuerzos en el aislamiento del sistema, pudiendo perjudicar a las fases sanas, y dañar al equipo, ver figura 4.19. En los sistemas no aterrizados los aparatos se encuentran completamente aislados, la corriente de falla a tierra es usualmente baja, se tiene buena seguridad con respecto a la aparición de gradientes de tensión, la operación de relevadores se dificulta.

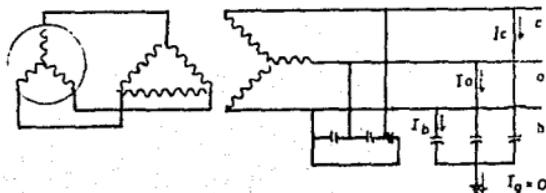


Figura 4.18. - Sistema con neutro no aterrizado.

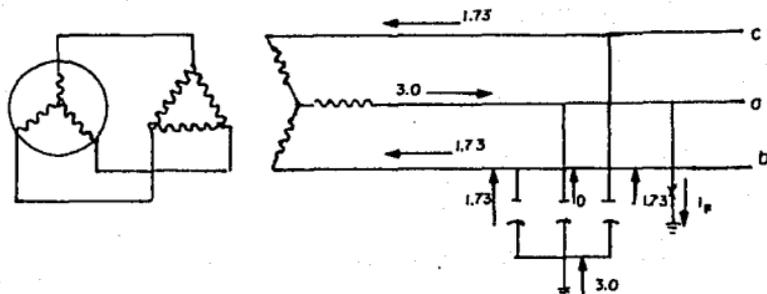


Figura 4.19.- Falla de fase a tierra en un sistema sin neutro aterrizado.

b) Conexión efectiva a tierra.

El neutro de un transformador está conectado efectivamente a tierra si no existe ninguna impedancia entre el neutro y tierra, son los sistemas de aterrizamiento más baratos. Para eliminar alguna falla es necesario abrir la línea. El valor de la corriente de falla a tierra rara vez es mayor que la corriente de cortocircuito trifásico, es improbable la aparición de arcos a tierra, se tiene una buena operación de relevadores, la protección con apartarrayos tiene en estos sistemas su máxima eficiencia y menor costo, la forma de operación es simple.

Se dice que un sistema está efectivamente aterrizado cuando para todos los puntos del sistema se cumple que:  $(X_0/X_1) < 3$  y  $(R_0/X_1) < 1$ , para cualquier condición de operación.

c) conexión a través de una resistencia.

Un sistema aterrizado a través de una resistencia se muestra en la figura 4.20. La resistencia tiene un valor considerablemente mayor que la reactancia del sistema en el punto donde se ha colocado. Consecuentemente la corriente de falla de fase a tierra es primeramente limitada por la misma resistencia a un valor mucho menor que la corriente

de cortocircuito trifásico, reduciendo el daño al equipo, el peligro de choque eléctrico y los esfuerzos mecánicos en los circuitos. Los arcos a tierra son poco probables, la operación de relevadores es satisfactoria, su costo es un valor medio.

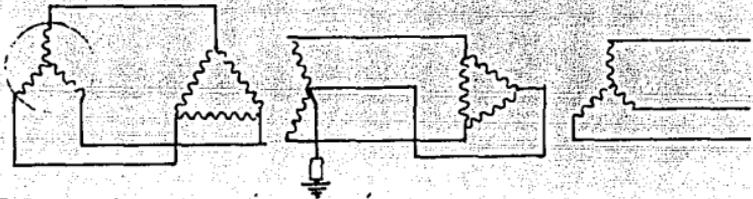


Figura 4.20. - Conexión a través de una resistencia.

d) Conexión a través de una reactancia.

Es el caso en que el sistema se aterriza por medio de una impedancia, cuyo elemento principal es una reactancia, que puede ser insertada directamente en la conexión a tierra. La acción de los relevadores es satisfactoria, la operación de arcos a tierra y fallas dobles es posible si el valor de la reactancia es muy grande, su forma de operación es sencilla, ofrece una mayor seguridad ante la aparición de gradientes de tensión que en el caso de la conexión efectiva a tierra. Se debe cumplir  $(X_0/X_1) > 3$ , pero debe ser menor que el valor considerarlo como aterrizado a través de un neutralizador.

e) Conexión a través de un neutralizador.

En este sistema la corriente capacitiva es equilibrada por un reactor conectado entre el neutro del transformador y la red de tierra. Cuando su fase del sistema cae a tierra, una corriente reactiva atrasada fluye del reactor a través del transformador hacia la falla y por lo tanto a tierra. Al mismo tiempo la corriente capacitiva fluirá de la línea a tierra, estas corrientes están prácticamente defasadas  $180^\circ$  y la corriente hacia tierra será la diferencia entre ellas, con una adecuada

calibración, las corrientes pueden hacerse casi iguales, y la diferencia será muy pequeña, y en general el arco no se podrá mantener, extinguiéndose la falla, ver figura 4.21.

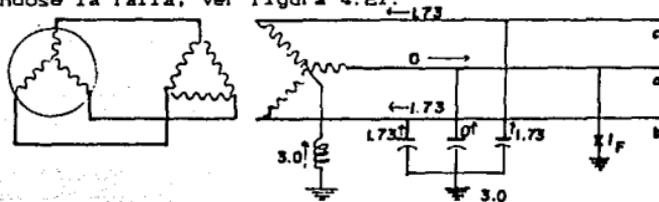


Figura 4.21. - Falla de fase a tierra en un sistema con neutro aterrizado a través de un neutralizador.

#### 4.3.2 Límites tolerables por el cuerpo humano al paso de la corriente.

La resistencia del cuerpo humano no es uniforme y depende de la humedad de las manos, el peso y la altura del cuerpo, así como el tipo de calzado. Una corriente de magnitud muy alta puede ser soportada sin causar fibrilación ventricular si la duración de exposición es muy corta. Dalziel concluyó a través de múltiples experimentos en la Universidad de Columbia, que el 99.5% de los hombres, soportan corrientes sin daño al corazón, determinados por la siguiente ecuación.

$$I_k^2 t = 0.027$$

De la cual:

$$I_k = 0.165 \sqrt{t} \quad [A]$$

donde:

$I_k$  - Es el valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo.

$t$  - Es el tiempo de exposición a la circulación de la corriente en segundos.

0.027 - Es una constante de energía obtenida empíricamente

Al circular una corriente de falla por la red de tierra, se originan elevados gradientes de potencial en la cercanía del punto de contacto a tierra. Existen tres tipos de tensiones cuando se hace contacto con superficies a diferente potencial, estas son las tensiones de paso, de contacto y de transferencia.

La tensión de paso es el potencial permisible que puede existir entre los pies de un individuo, cuya separación máxima se considera de un metro, cuando ocurre una falla, ver figura 4.22.

La tensión de contacto es la que aparece entre el punto en que se toca una estructura o un elemento conductor por el que circula una corriente de falla, y el punto sobre la superficie del terreno en el que los pies tienen contacto, la distancia horizontal entre estos dos puntos se considera de un metro, ver figura 4.23.

La tensión de transferencia puede considerarse un caso especial de la tensión de contacto. Si estando una persona dentro del área de una subestación toca un conductor puesto a tierra en un punto remoto o si una persona estando en un punto remoto, toca un conductor conectado a la red de tierra de la subestación, en este caso, la diferencia de potencial puede ser esencialmente igual al incremento de la tensión de la red de tierra, respecto a un punto de tierra remoto, en condiciones de falla y no una fracción de este total como es usualmente el caso de las tensiones de paso o de contacto. De aquí se tiene que puede existir un serio peligro debido a la transferencia de potencial en el caso de la falla entre el área interna de la subestación y puntos fuera de ella, por conductores tales como circuitos de señalización o comunicaciones, cañerías, vías férreas, etc. Por lo que se deberán tomar las medidas preventivas para evitar peligro, tales como juntas aislantes intercaladas en las vías, cuando estas salen de la subestación, instalación de tramos aislantes en las cañerías de agua y gas, etc., ver figura 4.24



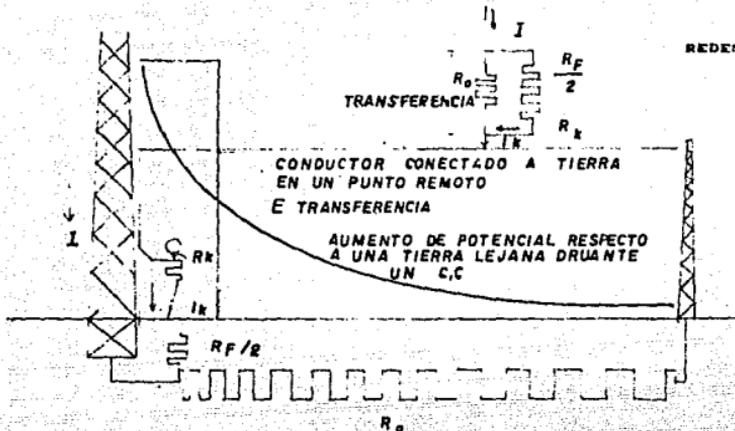


Figura 4.24.- Tension de transferencia

Usando la expresión anterior de la corriente y las constantes apropiadas en los circuitos equivalentes, es posible calcular la diferencia de potencial tolerables entre los posibles puntos de contacto, quedando :

$$E_{\text{paso}} = I_k (R_k + 2R_F) \quad [V]$$

$$E_{\text{paso}} = (165 + P_s) \sqrt{L} \quad [V]$$

$$E_{\text{contacto}} = I_k (R_k + \frac{1}{2}R_F) \quad [V]$$

$$E_{\text{contacto}} = (165 + 1.5P_s) \sqrt{L} \quad [V]$$

Donde:  $P_s$  es la resistividad superficial que toca el pie.

$E_{\text{paso}}$  -Es la diferencia de potencial tolerable entre dos puntos en el suelo que pueden ser tocados simultáneamente por los pies.

$E_{\text{contacto}}$  -Es la diferencia de potencial entre un punto en el suelo donde una persona esta parada y otro punto cualquiera que pueda ser tocado por la mano.

Si la resistividad del terreno es grande es recomendable colocar materiales altamente resistivos como son tezontle, grava suelta, etc. Para disminuir el riesgo que se corre al aparecer este tipo de tensiones.

#### 4.3.3. Tipos de sistemas de tierras.

Basicamente existen tres tipos de sistemas:

##### a) Sistema radial.

La configuración de este sistema, es através de uno o varios electrodos, a los cuales se conectan en forma directa o indirecta e individual las derivaciones de cada aparato, equipo o instalación por aterrizar.

Este sistema, a pesar de ser muy económico, su funcionamiento no es muy satisfactorio. cuando hay una falla en el equipo a proteger, se originan elevados gradientes de potencial, creados por la propia configuración del sistema, el cual al no ser este capaz de disipar dichos gradientes en un tiempo razonable.

##### b) Sistema de anillo.

El sistema de anillo se conforma mediante la instalación de un conductor de cobre de suficiente sección transversal, instalado en forma perimetral alrededor del área que se desea proteger, interconectando mediante el proceso de soldadura por a una serie de electrodos estratégicamente instalados a lo largo de su trayectoria, del que se derivan conexiones para cada uno de los aparatos equipos o instalaciones a aterrizar.

Este sistema económico y eficaz, elimina las grandes deficiencias de potencial de las descargas a tierra presentadas por el sistema

radial, reduciendo los elevados gradientes de potencial, que son dispersados fácil y rápidamente por los electrodos de tierra colocados a todo lo largo del perímetro del área a proteger.

#### c) Sistema de red.

Este sistema consiste en una malla formada por conductores de cobre desnudos de calibre adecuado, interconectados entre sí, y a su vez a una serie de electrodos de tierra, mismos que se enclavan en el terreno natural a determinada profundidad con objeto de localizar zonas de menor resistividad que brinden una mejor dispersión de la corrientes de falla y la eliminación de elevados gradientes de potencial. Aunque es el más costoso de los tres, su elevada eficiencia lo hace más seguro, razón por la cual es el más utilizado en la actualidad.

#### 4.3.4. Resistividad del terreno.

La resistividad o resistencia específica, es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, y depende del tipo de suelo, la humedad del mismo, su contenido de sales, las zonas climáticas, las estaciones del año y la temperatura. La influencia de cada una de estas variables sobre la resistividad es diferente.

Un suelo muy húmedo tiene una resistividad muy pequeña, cuando esta seco se instalan electrodos verticales con el fin de encontrar zonas húmedas y se coloca la red a mayor profundidad. La resistividad disminuye rápidamente hasta que la humedad alcanza el 20%, a partir de este punto solo se consigue una leve disminución de la resistividad con el aumento de humedad, como se aprecia en la figura 4.25

Debido a la temperatura, la resistividad crece muy lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta el punto de congelación del agua, y por debajo de este punto la resistividad crece rápidamente al disminuir la temperatura. En zonas donde en el invierno se congela el suelo hasta una cierta profundidad, el sistema de tierra debe instalarse por debajo del nivel de congelación si se quiere un valor aceptable de resistencia durante todo el año, esto se aprecia en la figura 4.26.

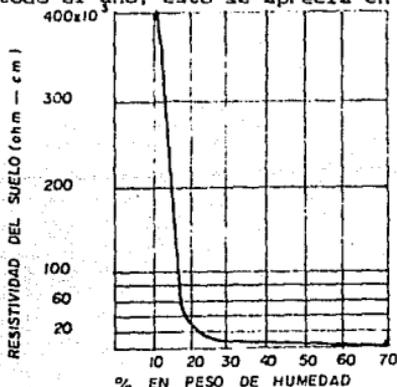


Figura 4.25. - Variación de la resistividad con respecto a la humedad

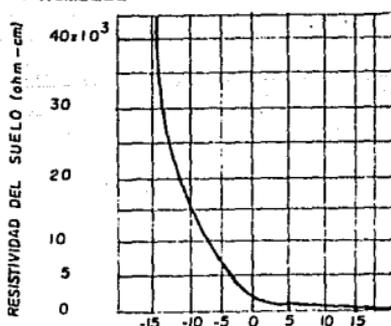


Figura 4.26. - Variación de la resistividad con respecto a la temperatura.

El contenido de sales influye en la resistividad. La tabla 4.3. muestra la reducción en la resistividad de arcilla arenosa por un incremento en el contenido de sales, esta tabla corresponde a arcilla arenosa con 15% de peso de humedad y un 17°C de temperatura.

| Sal agregada<br>(% en peso de humedad) | Resistividad<br>(ohm-cm) |
|--|--------------------------|
| 0                                      | 10,700                   |
| 0.1                                    | 1,800                    |
| 1.0                                    | 480                      |
| 5.0                                    | 190                      |
| 10.0                                   | 130                      |
| 20.0                                   | 100                      |

Tabla 4.3. - Resistividad del suelo con respecto al contenido de sal.

Un terreno seco tiene alta resistividad, pero un terreno húmedo también puede tenerla si no contiene sales solubles, es decir si el agua es muy blanda, en zonas donde el régimen de lluvias es muy elevado, la resistencia del suelo es muy alta aún con el suelo saturado de agua, la cantidad de lluvia hace que se laven los electrodos naturales, dejando un suelo con alta resistividad.

#### 4.3.4.1. Medición de resistividad.

La medición de resistividad del terreno, parámetro fundamental en el diseño y comportamiento de electrodos de conexión a tierra, se realizan mediante el método de Frank-Wenner, denominado también de los cuatro electrodos.

El equipo de medición utilizado es el megger de tierras, que tiene un costo muy alto, y consiste en una fuente de potencial, un circuito que suministra la corriente y un circuito de medición, como se ilustra

en la figura 4.27, estos elementos se pueden sustituir en la construcción de un medidor de tierra que sea mucho más económico e igual de eficaz. Si elimina el generador y se sustituye por una fuente de corriente alterna a través de un contacto común, el circuito de medición se puede reemplazar por un multimetro de uso común y realizar las mediciones en un puntos exteriores. Durante las pruebas los valores obtenidos no eran muy consistentes y no siempre se cuenta con una conexión de corriente alterna, por lo que se puede usar corriente directa de una batería de automóvil o de una portátil, se incluye un galvanómetro para medir al mismo tiempo los valores de tensión y corriente, resulta el medidor que se muestra en la figura 4.28, cuyo costo aproximado es del 1% del valor del megger comercial.

El método de Wenner consiste en la inyección de corriente directa entre dos electrodos extremos (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>) midiendo el valor de esta corriente I después del electrodo de salida (C<sub>2</sub>) y el potencial V se mide entre los electrodos intermedios P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub> colocados en línea recta con los electrodos de corriente, todos ellos separados una misma distancia "a" y a una profundidad "b", como se ilustra en la figura 4.29. La relación V/I se conoce como la resistencia aparente y su valor depende fundamentalmente de la separación "a" entre electrodos, pues cuando estos están muy próximos se obtienen valores de resistencias muy altos debido a que la corriente de prueba fluye principalmente cerca de la superficie y por la influencia mutua entre dos electrodos, ver figura 4.30. Conocida la resistencia R del terreno la resistividad aparente del terreno esta dada por:

$$P = \frac{4\pi aR}{[(1+2a)\sqrt{(a^2+4b^2)}] - [2a\sqrt{(4a^2+4b^2)}]}$$

Donde:

P - es la resistividad del terreno [Ωm]

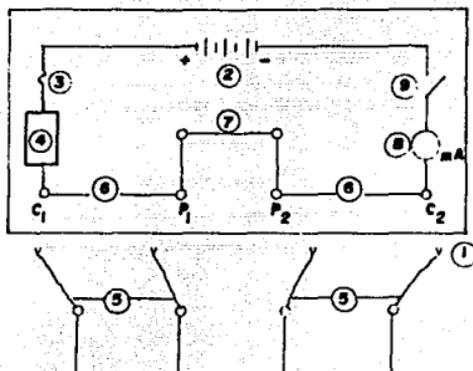
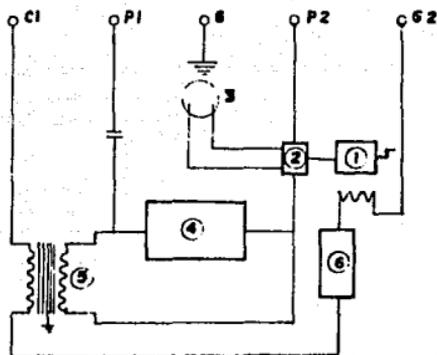
a - es la separación entre los electrodos [m]

$R$  - es la resistencia media en el instrumento [  $\Omega$  ]

$b$  - es la profundidad del electrodo [ m ]

Si se emplea una relación de  $a/b = 20$ , entonces la resistividad se puede calcular como:

$$P = 2\pi aR \text{ [ } \Omega\text{m]}$$



- 1.-Generador CA.
- 2.-Rectificador mecánico.
- 3.-Galvanómetro.
- 4.-Resistencia variable.
- 5.-Transformador.
- 6.-Resistencia de carga.

- 1.-Caja de lámina.
- 2.-Batería
- 3.-Fusible.
- 4.- selector de resistencia de carga.
- 5.-Cables de conexión para varillas de prueba.
- 6.-Borneros para conexión de cables de prueba.
- 7.-borneros para medición de tensión.
- 8.-Amperímetro
- 9.-Interruptor.

Figura 4.27 y 4.28.-Medidor comercial y el diseño del medidor de tierras.

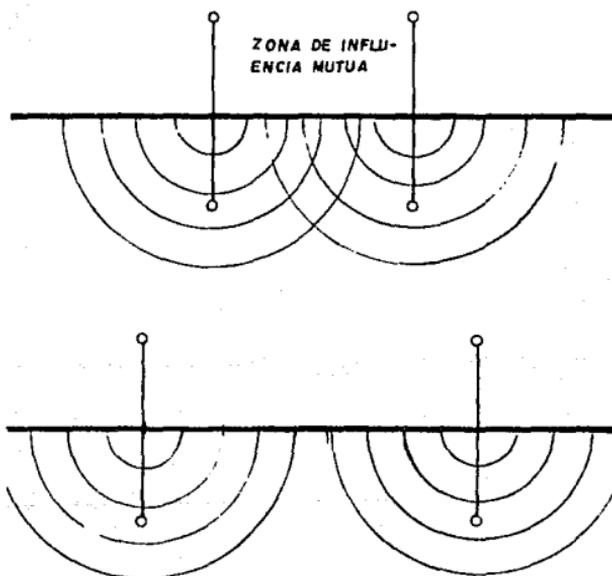
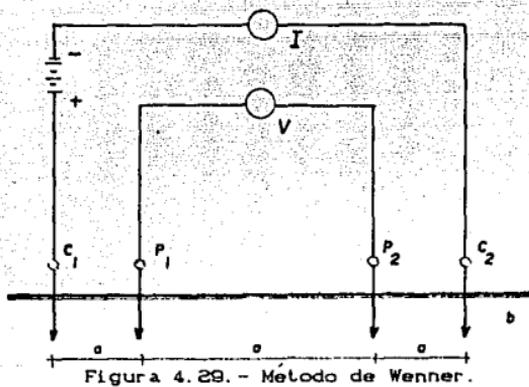


Figura 4.30. -Electrodos muy próximos y convenientemente distanciados.

#### 4.3.4.2. Medición de la resistencia a tierra.

La resistencia a tierra de un electrodo está dado por la suma de varias resistencias; la de contacto en las conexiones, la propia del electrodo, la del electrodo y el medio que lo rodea, y por supuesto la que presenta el terreno, siendo esta última la de mayor importancia.

El método más empleado para la medición de la resistencia de conexión a tierra consiste en la inyectar una corriente mediante una fuente de tensión, que no sea peligrosa y que permita la medición, a través del electrodo bajo prueba y de un electrodo auxiliar, llamado electrodo de corriente, y al mismo tiempo se determina la tensión creada entre el electrodo de prueba y un punto sobre la superficie del terreno mediante un segundo electrodo o sonda potencial.

La elevación de tensión del electrodo  $V_m$ , creada por  $I_m$ , se mide por medio de la sonda de potencial, la resistencia del electrodo vendrá dada por:

$$R = V_m / I_m \text{ (}\Omega\text{)}$$

La dirección ideal del cable asociado a la sonda de potencial deberá formar un ángulo de  $90^\circ$  en relación con la recta que forma el electrodo bajo prueba y el electrodo auxiliar de corriente.

Para obtener el valor correcto de  $V_m$ , se deberán efectuar varias mediciones a distancias crecientes a partir del electrodo bajo prueba, y cuando se obtengan varias lecturas similares, podrá considerarse que el valor de  $V_m$  es correcto.

El método de la caída de tensión es un caso particular del método anterior, ver figura 4.31 Para obtener el valor de  $V_m$ , la sonda de potencial, se mueve en forma regular a lo largo de la recta que forman el electrodo bajo prueba y el electrodo de corriente.

Para cada punto se mide el valor de la tensión  $V$  y la corriente  $I$ , obteniéndose los valores de  $R$ , y que al graficarlos obtendremos una curva cuya parte plana representa el valor de la resistencia de la toma de tierra, ver figura 4.32.

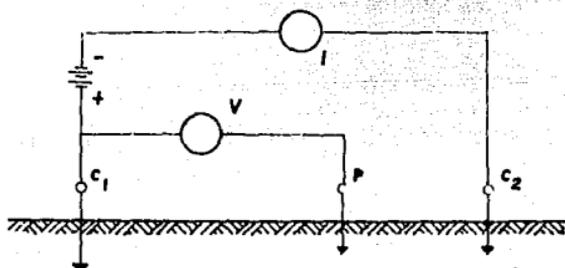


Figura 4.31. - Método de la caída de tensión.

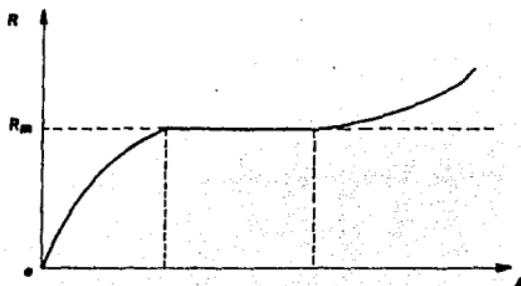


Figura 4.32. - Gráfica E-I resultante.

#### 4.3.5. Tipos de electrodos.

Dependiendo de las características del terreno y del valor de resistencia que presenta un electrodo, la cual no puede ser mayor de 10  $\Omega$ , existen diferentes métodos para aterrizar los equipos, mismos que se tratan a continuación:

#### 4.3.5.1. Electrodo profundos.

Cuando el terreno es penetrable, a medida que incrementamos la profundidad disminuye la resistividad, esto se debe al aumento de la humedad, por lo que los mejores suelos conductores están a niveles más profundos, además la resistencia obtenida es estable y casi independiente de las variaciones climatológicas.

La forma más sencilla para enterrar un electrodo, es mediante un mazo, pero esto no es fácil de lograr cuando el suelo está formado por roca como en algunas zonas de la ciudad de México, en este caso lleva a cabo la siguiente metodología.

Básicamente consiste en hacer perforaciones profundas con una broca de tungsteno, que es enfriada mediante agua a presión, la broca va colocada en el extremo de un tubo que la hace girar penetrando en el terreno, los extremos de los tubos están roscados de tal forma que se pueden acoplar en tramos de 3 metros conforme hayan sido enterrados, para así continuar con la penetración hasta alcanzar la profundidad necesaria.

Conforme se introduce la tubería se va midiendo la resistencia a tierra y la perforación se suspende cuando se logra un valor aceptable, o bien si la profundidad es mayor a 100 metros ya que los esfuerzos mecánicos pueden romper la broca, la cual es de un costo elevado. Al lograr un valor conveniente, se saca la tubería y se cambia la broca de tungsteno por una de barril diamantado de corona y se repasa la perforación, después se deposita el conductor de cobre desnudo de cuatro ceros al que se le adiciona peso en la punta, la tubería de la broca sirve como guía para el conductor, y después se retira de la perforación, luego se rellena con arcilla el espacio que existe entre el conductor y la roca y se efectúa la medición final. Este método es muy efectivo para mejorar los valores de la resistencia en las tomas de tierra, pero es demasiado costoso debido a los medios empleados para efectuar la perforación.

## 4.3.5.2 Electrodo Múltiples.

Cuando la resistividad de las capas superiores del terreno es más baja que la de las capas más profundas, el electrodo profundo es antieconómico, y en algunos casos es impracticable, por lo que una alternativa la constituyen los electrodos múltiples que son dos o más electrodos enterrados en paralelo, separados por una distancia constante y conectados entre sí con un conductor de cobre desnudo.

Si los electrodos están muy espaciados tienden a seguir el comportamiento de las resistencias en paralelo, estas distancias tienen limitaciones prácticas y económicas, por ejemplo la resistencia que tienen cuatro electrodos separados por 1.5 metros es casi la misma que para tres electrodos separados 3 metros, pero obviamente con un costo menor en el segundo caso, conociendo la resistencia de un electrodo se puede aproximar el área y el número de electrodos necesarios para un valor de resistencia determinado.

La figura 4.33. muestra diferentes arreglos de electrodos y el porcentaje que reducen el valor de la resistencia con respecto a uno solo.

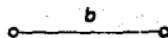
Figura 4.33. -Arreglo de electrodos múltiples...

Valor esperado

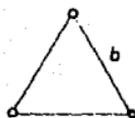
Dos electrodos en paralelo reducen al 55% la resistencia de uno.

Tres electrodos en línea recta reducen al 35% .

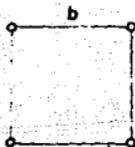
Arreglo



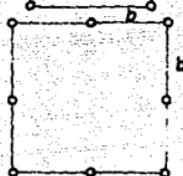
Tres electrodos en delta  
reducen al 38%



Cuatro electrodos en cuadro  
reducen al 28%



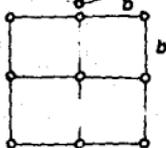
Ocho electrodos en cuadro  
reducen al 17%



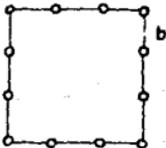
Ocho electrodos en círculo  
reducen al 16%



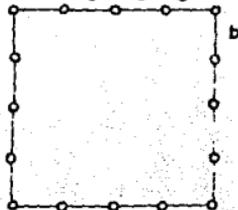
Nueve electrodos en cuadro  
sólido reducen al 16%



Doce electrodos en cuadro  
reducen al 12%.



Dieciseis electrodos en  
cuadro reducen al 9%



#### 4.3.5.3 Electroodos químicos.

En algunos terrenos, la resistividad es muy elevada por lo que se modifica artificialmente el medio que rodea a el electrodo, para reducir el valor de la resistividad del suelo, algunos substancias usadas son el coke bentonita y algunas sales simples.

##### 4.3.5.3.a Arreglo de sales simples.

Las sales deben de ser colocadas preferiblemente en una zanja circular rodeando al electrodo y cubiertas con tierra, sin entrar en contacto directo con el electrodo, para lograr la mejor distribución de sales con el menor efecto corrosivo. El sulfato de magnesio, sulfato de cobre y cloruro de sodio (sal común), son las sales más empleadas. El sulfato de magnesio es el menos corrosivo y la sal común es la más económica. De la tabla 4.3 vemos que el agregado de sal en un 1% en peso de la humedad puede reducir la resistividad al 4.3% de su valor en ausencia de sal. El agregado de sales produce una mejor uniformidad estacional de la resistencia, una disminución de la humedad significa un aumento en la concentración de sales, lo que contrarresta el efecto de secado. La sal hace descender al punto de congelación del agua, ampliando el margen del punto crítico por debajo del cual la resistencia aumenta abruptamente. El agregado de sales no es permanente porque las sales son disueltas por las lluvias en el suelo, por lo que deben reponerse después de un cierto tiempo, que depende de la frecuencia de las lluvias y la porosidad del suelo, para mantener el valor de la resistividad deseado.

##### 4.3.5.3.b Agregado de coke.

La resistividad del coke es de 130 ( $\Omega$ -cm), que es muy inferior a la de la mayoría de los suelos, independiente del contenido de humedad. Se hace una excavación en la cual se introduce el electrodo.

rellenándola luego con coke, con lo que se logra una reducción apreciable de la resistencia aunque no independiente de la humedad ya que la cantidad de coke es pequeña comparada con el volumen del suelo, por lo que la variación respecto a la humedad es casi la misma que si no estuviera tratado el electrodo. El coke no necesita renovarse, es decir, es permanente en el tiempo, aunque debe excavarse para su colocación además de que es más corrosivo que la sal común.

#### 4.3.5.3.c Agregado de bentonita.

Consiste en infiltrar la perforación en que ha de instalarse el electrodo con una solución de bentonita que llena las grietas y fisuras naturales, proveyendo una buena conductividad. La bentonita es un mineral, básicamente arcilla, con capacidad de absorber agua y retenerla, buen conductor de la electricidad, y que además protege la corrosión en los electrodos ferrosos. Puede usarse en cualquier tipo de terreno y no solo para el caso de altas resistividades, por ejemplo, en terrenos de baja resistividad con agua subterránea muy corrosiva.

#### 4.3.5.4. Electrodo horizontales.

Consisten en enterrar un conductor de cobre desnudo a una profundidad que puede ser de 0.5 a 1 metro. En subestaciones de potencia se instala una malla cuadrículada, y para redes de distribución los arreglos más comunes son los que aparecen en la figura 4.34.

El inconveniente que se presenta es el de requerir una canalización que pueda ser muy costosa. Su aplicación en sistemas de distribución básicamente en fraccionamientos y conjuntos habitacionales, ya que se requiere espacio y las obras subterráneas en estos casos son de grandes longitudes el conductor se coloca en las mismas canalizaciones que se hacen para los cables de mediana tensión como se ve en la figura 4.35.

REDES DE TIERRA

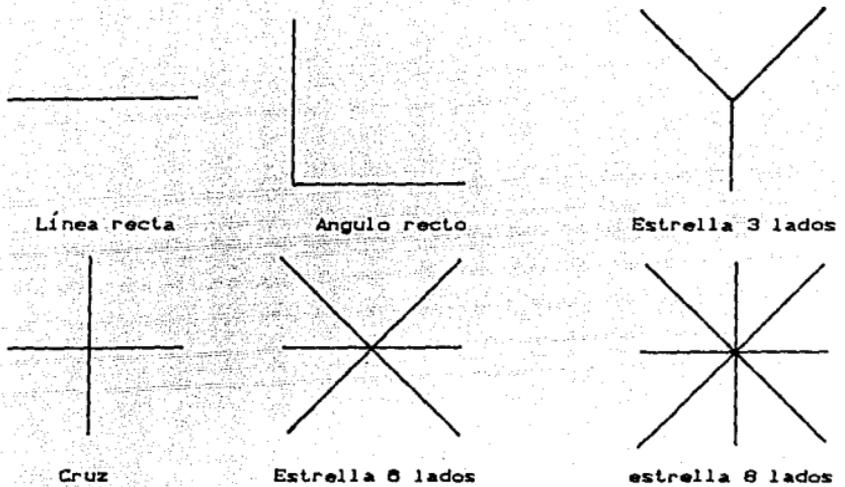


Figura 4.35.-Electrodos horizontales.

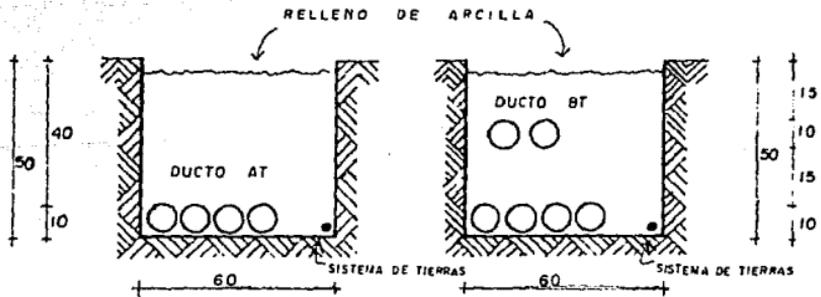


Figura 4.35.-Canalizaciones subterráneas.

#### 4.3.6 Conclusiones.

1) La conductancia de un electrodo depende mucho de su longitud y muy poco de su sección transversal, conviene usar electrodos de menor sección compatible con la resistencia mecánica necesaria para su instalación.

2) En terrenos donde la resistividad aumenta con la profundidad o que no son penetrables, la alternativa es el uso de electrodos múltiples en paralelo.

3) En terrenos de muy alta resistividad, el uso de procedimientos artificiales puede ser una alternativa económica. Debe evitarse la adición de sales simples y coque por su acción corrosiva y corta permanencia, y utilizar el método de la inyección de bentonita que ofrece mayores ventajas.

4) A temperaturas del suelo por encima de  $0^{\circ}\text{C}$ , el contenido de humedad influye más que la temperatura, por lo que es aconsejable alcanzar las capas de humedad estable.

5) Las mediciones de tierra se efectúan para: determinar la resistividad del terreno con fines de diseño de sistemas de conexión a tierra, conocer los valores de resistencia del dispositivo de conexión a tierra recién instalado, para saber si tienen los valores que garanticen la seguridad del personal y del equipó en una instalación eléctrica, evaluar periódicamente si los sistemas de conexión a tierra conservan sus valores de instalación o éstos se han perdido debido a fallas mecánicas o por la acción química del terreno.

6) Se sabe que la mayor parte de la concentración de densidad de corriente que fluye a tierra se concentrará en la perifería de la red particularmente en las esquinas, por lo que se recomienda concentrar los conductores en dicha zona como medio efectivo para el control de gradiente de potencial.

# **CAPITULO 5**

## **CONCLUSIONES Y REGOMENDACIONES**

## 5.1 INTRODUCCION.

El propósito de este capítulo es el de hacer mención de algunas técnicas que diversas compañías dedicadas a la distribución de energía eléctrica han implementado para lograr la protección contra descargas atmosféricas a los circuitos primarios.

Dentro de estas experiencias se encuentran investigaciones realizadas desde la simulación del comportamiento de las líneas ante las descargas atmosféricas, realizando en modelos analógicos, hasta técnicas y esquemas implementados en instalaciones reales con diversos sistemas de protección y diferentes niveles básicos de aislamiento al impulso.

Con esto se espera lograr, en base a las experiencias obtenidas, un criterio que proporcione las consideraciones y recomendaciones que se deben de tomar en cuenta para lograr un mejor comportamiento y la confiabilidad de las líneas de distribución primaria ante las sobretensiones en los sistemas eléctricos.

## 5.2 INVESTIGACIONES EN MODELOS ANALOGICOS.

En los Estados Unidos, la General Electric Co. y ocho compañías eléctricas más, llevaron a cabo una investigación en los modelos analógicos para determinar el esquema que ofreciera la mejor protección entre las descargas atmosféricas. Este proyecto de investigación se llevó a cabo en el laboratorio de alta tensión de Pittsfield, Massachusetts, consistiendo de un análisis del comportamiento de doce modelos a escala de 1:50 ante la incidencias de corriente transitoria de magnitud reducida a la misma escala, en puntos predeterminados, tales como a medio claro, a una cuarta parte del mismo y en extremo del poste. Se realizaban mediciones de tensión registradas en un osciloscopio para determinar así las tensiones entre fases, entre fase y tierra y entre fase y neutro en el punto de incidencia de la descarga y a uno, dos y tres claros de dicho punto. Las características de operación de los apartarrayos fueron simuladas mediante el empleo de dispositivos

electrónicos transistorizados, que proporcionaron un buen grado de precisión en la simulación.

Los esquemas que se implementaron con los modelos analógicos fueron:

- 1.- Apartarrayos instalados en todas las fases.
- 2.- Apartarrayos instalados únicamente en la fase más alta.
- 3.- Hilo de guarda a todo lo largo del circuito.
- 4.- Sin protección alguna, pero con un incremento en el NBI

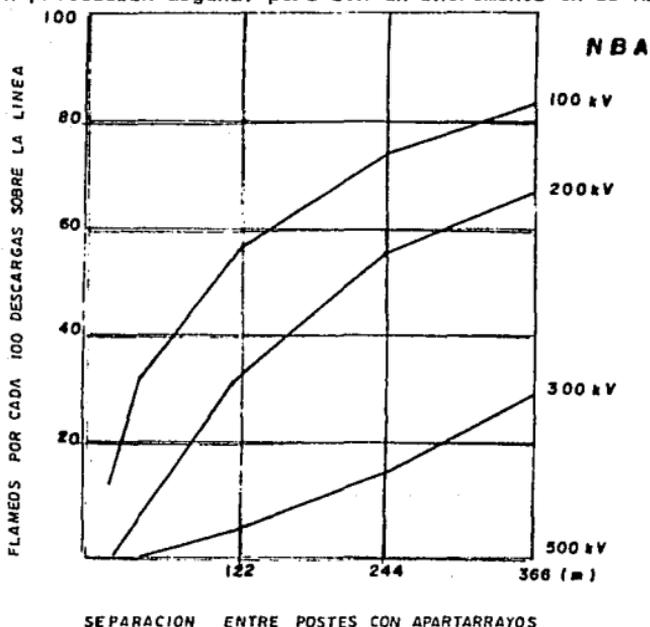


Figura 5.1.- Comportamiento de una línea protegida con apartarrayos en todas sus fases.

De los resultados obtenidos de estos estudios se apreció que el método más eficiente de protección contra sobretensiones se logra cuando se instala apartarrayos en todas las fases; También se apreció que para un rango de 10 a 100 Ohms de resistencia en la toma de tierra en la base del poste, los resultados no difieren en mucho, esto se aprecia en la figura 5.1.

El esquema sin protección alguna presentó una incidencia de 85 a 90 flameos por cada 100 descargas en la línea, para un rango de 100 a 700 KV de NBI, como se aprecia en la figura 5.2, desprendiéndose la consideración de que el incremento del NBI de una línea sin ningún dispositivo de protección, aparte de restaurar antieconómico, no ofrece ninguna mejoría en la protección de la línea, siendo por consecuencia lógica el menos eficiente.

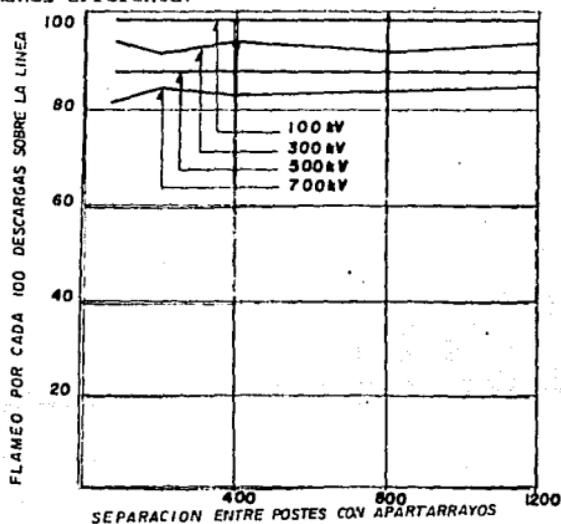


Figura 5.2. - Comportamiento de una línea sin protección y diferentes valores del NBI.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El arreglo con hilo de guarda y el que tiene apartarrayos en las fases más alta, muestra comportamientos intermedios entre los casos anteriores, como se prueba en las figuras 5.3. y 5.4.

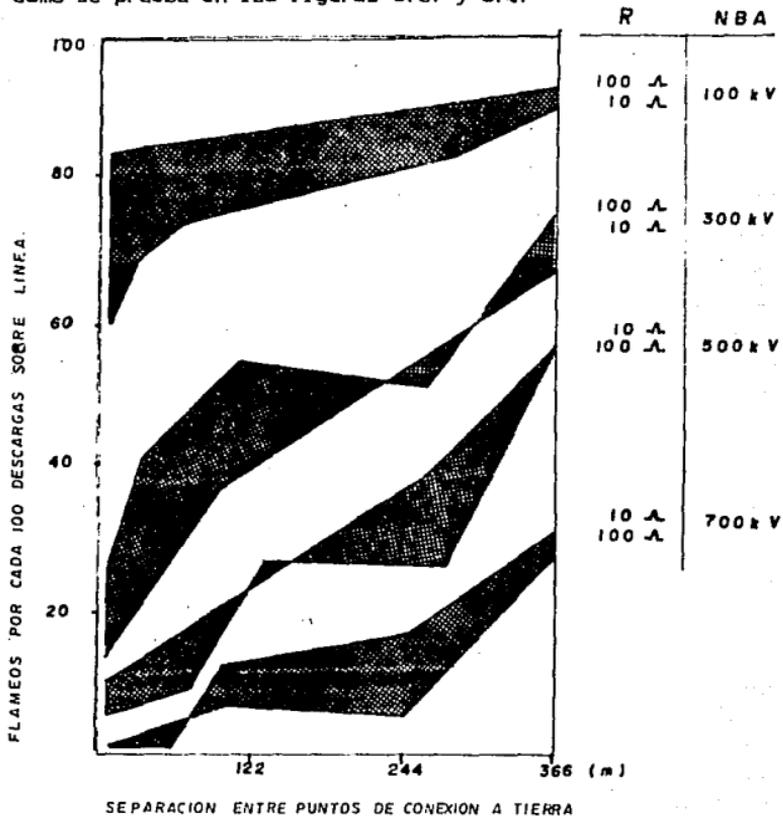


Figura 5.3.- Comportamiento de una línea protegida con un hilo de guarda.

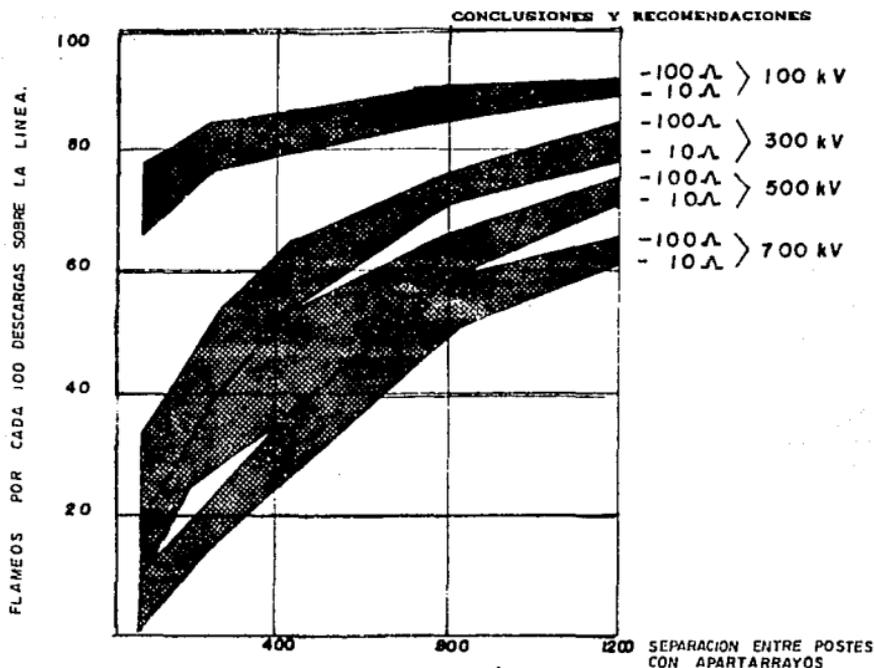


Figura 5.4. - Comportamiento de una línea protegida con apartarrayos en la fase más alta.

### 5.3. INVESTIGACIONES EN INSTALACIONES DE CIRCUITOS REALES.

#### 5.3.1. Experiencia en Japón.

Dentro de las investigaciones con circuitos reales, una de las experiencias más importantes es la que se realizó por el Comité de Protección de Líneas de Distribución contra Descargas Atmosféricas del Japón, en el periodo comprendido entre 1959 y 1964.

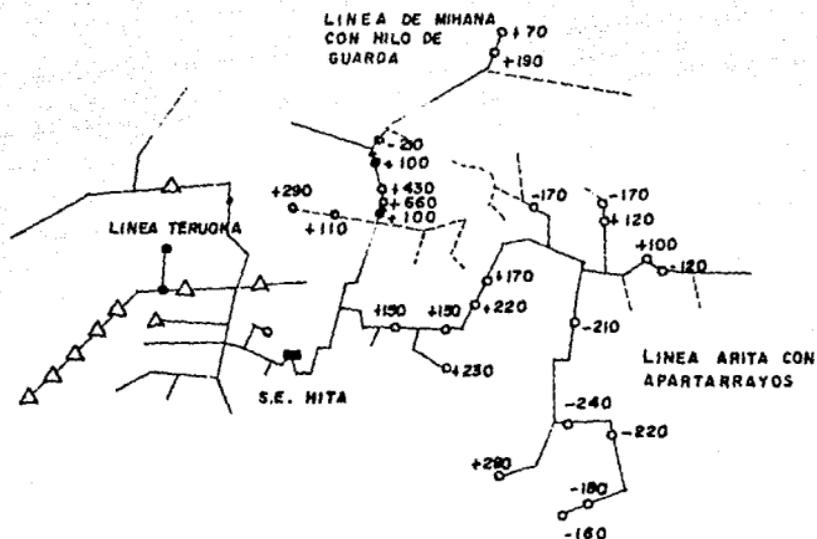
## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el valle de Hida, comprendido dentro del área de servicio de la Kyushu Electric Power Co. se efectuó una comparación detallada del daño producida por las descargas atmosféricas en tres líneas de distribución de 8.8 KV. La línea Arita protegida con tres juegos de apartarrayos por kilómetro; La línea Mihana con hilo de guarda aterrizado cada 300 metros y con un ángulo de protección de  $45^{\circ}$ ; y la línea Teruoka sin protección alguna. Toda las líneas estaban instaladas en una área que exhibía la misma severidad atmosférica.

En la figura 5.5 se muestra el comportamiento de las tres líneas durante el 13 de Julio de 1962. En la línea Arita se presentó una corriente máxima de descarga de 290 amperes sin ningún daño. En la línea Mihana se registró una corriente máxima de 650 amperes en un punto de puesta a tierra del hilo de guarda en este caso sólo se ocasionó la operación de los fusibles de los transformadores de distribución en dos puntos del circuito. En la línea Teruoka se dañaron tres transformadores y operaron los fusibles de otros once.

En la figura 5.6. se muestra el comportamiento de las tres líneas durante el 29 de Julio de 1963. En la línea Arita se presentó una corriente máxima de descarga de 850 amperes y se dañó un transformador. En la línea Mihana se registraron corrientes a tierra de 850 amperes sin ningún daño. En la línea Teruoka se dañaron 4 transformadores.

En la figura 5.7 se ilustra el comportamiento de las tres líneas durante el 4 de Agosto de 1963. En la línea Arita operaron los fusibles en tres puntos, sin ningún daño a los equipos, registrando corrientes de descarga máxima de 870 amperes. En la línea Mihana se registraron corrientes máximas de 510 amperes en las tomas de tierra del hilo de guarda, sin ningún daño. En la línea Teruoka operaron los fusibles en once puntos, pero no se registraron daños en los equipos.



- TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION DAÑADO
- △ FUSIBLE DE TRANSFORMADOR FUNDIDO
- REGISTRO MAGNETICO DE SOBRECORRIENTE (unidades en Ampers)
- LINEA TRIFASICA
- - - LINEA MONOFASICA

Figura 5.5. - Comportamiento de las líneas Arita, Mihana y Teruoka durante el 13 de Julio de 1962.

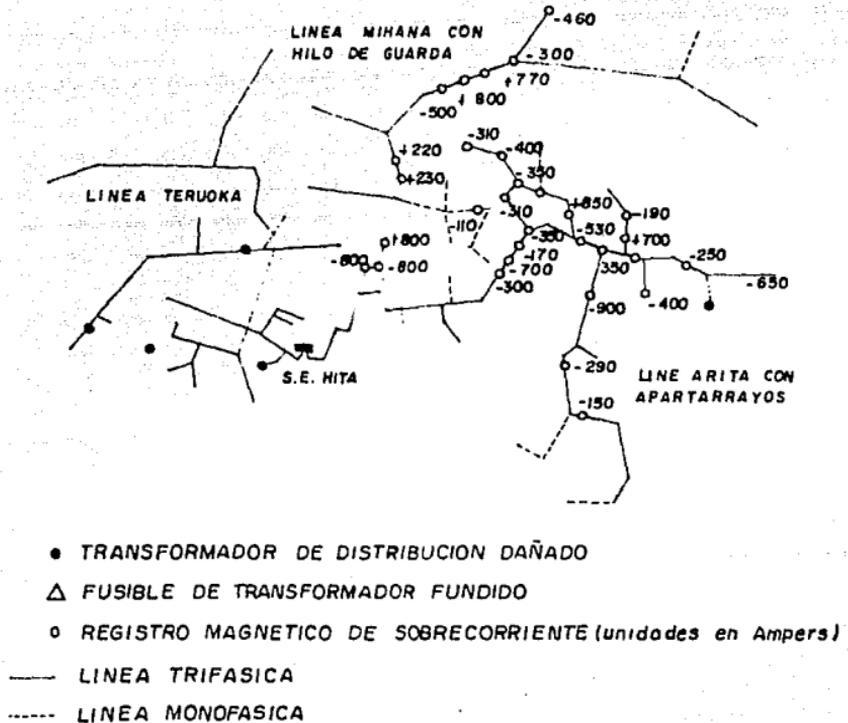
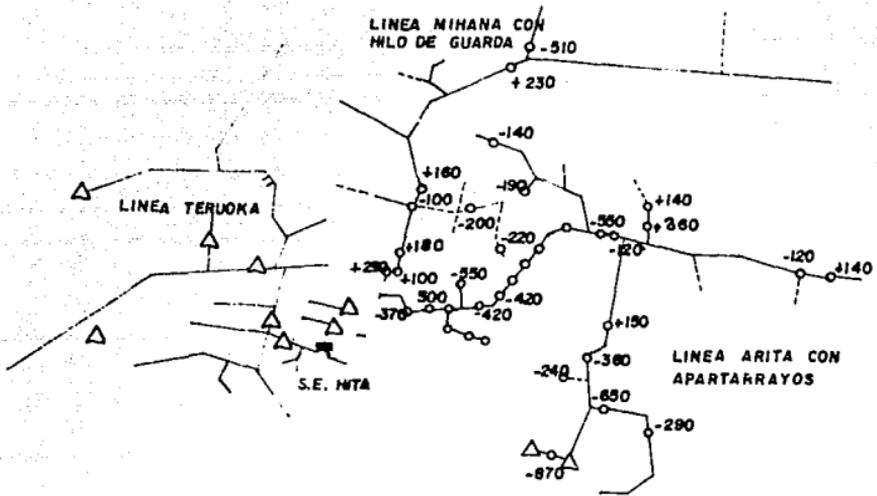


Figura 5.6. - Comportamiento de la líneas Arita, Mihana y Teruoka drante el 29 de Julio de 1983.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



△ FUSIBLE DE TRANSFORMADOR FUNDIDO

○ REGISTRO MAGNETICO DE SOBRECORRIENTE (unidades en amperes)

— LINEA TRIFASICA

---- LINEA MONOFASICA

Figura 5.7.- Comportamiento de las líneas Arita, Mihana y Teruoka durante el 4 de Agosto de 1963.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante los seis años de investigación se dañaron un total de 285 transformadores de distribución en 112 líneas con apartarayos. Los índices de daño de los transformadores por cada línea de distribución, calculados por la ecuación que a continuación se escribe, están graficados en la figura 5.8 en relación con el número de juegos de apartarayos por kilómetro en la línea:

$$s = [ \alpha / (ALD) ] \times 100$$

En donde:

- s es el índice de daño por descarga atmosféricas.
- A es el número total de transformadores de distribución instalados en la línea.
- $\alpha$  es el número de transformadores de distribución dañados en cada línea.
- L son los días de tormenta en una estación de lluvias de la región en que se encuentran las instalaciones.

En la misma figura se puede apreciar que los índices de daño están distribuidos entre el eje horizontal y la línea punteada.

Por ejemplo, el índice de daño cuando se tienen de 4 a 5.25 juegos de apartarrayos por kilómetro es menor de 0.15 %, haciendo consideración de que los daños para este caso son causados por descargas directas ó severas sobretensiones inducidas por las descargas cercanas a la línea. Sin embargo, los puntos que se encuentran en la región en la cual el índice de daño es menor de 0.15 % y se tienen menos de 1.5 juegos de apartarrayos instalados por kilómetro en la línea, corresponden a regiones en donde los días de tormenta son comparativamente menores, aún cuando se tengan pocos juegos de apartarrayos instalados en la línea.

El índice de daño límite para transformadores de distribución y la línea punteada en la figura 5.8, se encuentran indicados en la figura

5.8 por las líneas continua y punteada respectivamente, la manera en que se obtubieron está dada por el método de los mínimos cuadrados. Las relaciones entre  $\sigma$  y  $\epsilon$  están expresadas:

$$\epsilon = -0.65 \log_{10} \sigma + 0.66$$

para la línea continua, y:

$$\epsilon = -0.63 \log_{10} \sigma + 0.63$$

Para la línea punteada, donde  $\epsilon$  es el índice de daño por día de tormenta y  $\sigma$  es el número de juego de apartarrayos instalados por kilómetro ( $0.1 \leq \sigma \leq 5.25$ ). Estas ecuaciones son muy usadas para estimar el límite de daño a transformadores de distribución por días de tormenta en relación con los juegos de apartarrayos instalados por kilómetro en la línea.

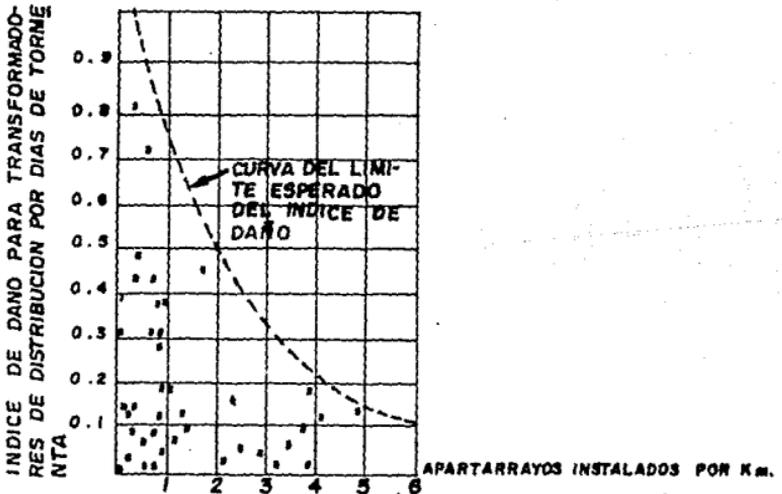


Figura 5.8. - Índices de daño por día de tormenta .vs. Número de juegos de apartarrayos instalados por kilómetro.

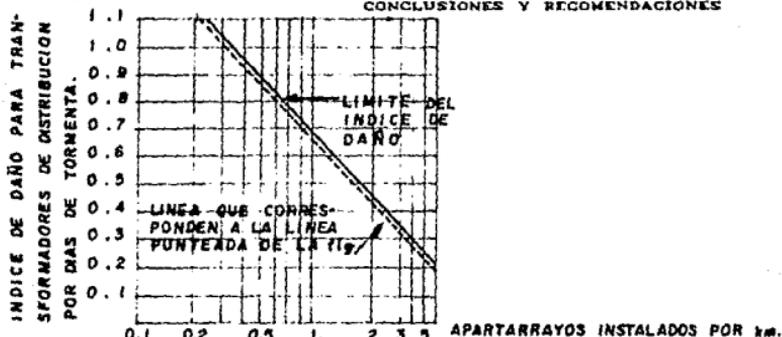


Figura 5.3. - Índice de daño límite por día de tormenta.

### 5.3.2 Experiencia en Estados Unidos.

La experiencia en los Estados Unidos ha sido bastante amplia, debido principalmente al gran número de compañías dedicadas a la distribución de energía eléctrica y el alto grado de confiabilidad que requieren los servicios en este país. A continuación se describen las experiencias de dos de estas compañías en lo tocante a la protección contra sobrelensiones.

#### 5.3.2.1 Experiencia de la Florida Power & Ligth Co.

El programa de protección contra descargas atmosféricas que desarrolló esta compañía se basa en varios años de estudio y esfuerzo para controlar la interrelación entre diversos factores que afectan la protección. El primer paso en el proceso del mejoramiento de la protección contra descargas atmosféricas de un sistema, fué elevar el NBI de las líneas de 350 KV, sin tomar en cuenta otros factores, logrando con esto solamente reducir el flameo de los aisladores por sobrelensiones inducidas.

El siguiente paso fué escoger entre el sistema de protección con hilo de guarda o con apartarrayos. En ese tiempo se creía que era

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

posible obtener el mismo grado de protección con cualquiera de los métodos, considerando que las variables que intervendrían, excepto el costo, fueran las mismas para cada caso. Esto obligó a comparar la economía de los dos sistemas, obteniendo de los resultados del estudio económico que la protección con apartarrayos era más económica para redes aéreas urbanas y que la protección con hilo de guarda era mejor para redes trifásicas rurales.

Se prosiguió entonces a la evaluación del arreglo en delta y del arreglo horizontal para la disposición de los conductores de las líneas. Primeramente se instalaron apartarrayos en la fase más alta del arreglo en delta, esperando que este conductor interceptaría todas las descargas y protegería a las otras dos fases, actuando como hilo de guarda. Desafortunadamente los resultados de este sistema de protección no fueron buenos, ya que se encontraron frecuentes flameos en los aisladores de las fases inferiores, a diferencia de los de la fase que contaba con la instalación de apartarrayos que no presentaban daño alguno. También se puede observar que este arreglo, con apartarrayos en todas las fases, tenía un mejor comportamiento que en el caso de la disposición horizontal con apartarrayos en las tres fases, aún cuando el NBI, la resistencia de la toma de tierra y la distribución de los apartarrayos en la línea fuesen los mismos.

Una consideración adicional por la que se prefiere la protección con apartarrayos a la del hilo de guarda, es la que los sistemas protegidos con apartarrayos son mucho menos sensibles a las variaciones de la resistencias de la toma de tierra, dado que estos dispositivos se conectan en paralelo a los aisladores, la máxima tensión aplicada a los aisladores será la de descarga de los apartarrayos, que es realmente independiente de la resistencia de la toma de tierra. Para el caso del hilo de guarda, un alto valor de la resistencias de la toma de tierra provocarían flameos en los aisladores de los conductores de fase cuando circule una corriente de descarga que fluye a tierra desde el hilo de guarda.

El siguiente paso fue determinar la distribución de los

apartarrayos para cada tipo de construcción: configuración triangular soportada por postes de madera, configuración horizontal en el mismo soporte y la utilización de postes de concreto. Haciendo uso de los datos proporcionados por un módulo previamente estudiado por un grupo especial, se desarrolló una relación entre el porcentaje de descargas que causen flameos en función de la separación entre la instalación de apartarrayos, como se aprecia en la figura 5.10. Se verificó con estos datos que para la construcción de configuración en delta sobre postes de madera un índice del 25 % de descargas que causan flameos en los aisladores es el punto económico óptimo. Se decidió un ajuste en el resto de la configuraciones de las líneas, con el objeto de obtener un resultado o grado de protección similar al alcanzado en líneas con configuración en delta. Este espaciamiento varió entre 70 metros, para líneas monofásicas sobre postes de concreto a 370 metros para configuraciones triangulares en postes de madera.

Otro factor a considerar es el de las fallas de los apartarrayos. La mayor parte de éstas se debió a baja capacidad térmica, o a la incapacidad de disipar altas energías que se encuentran involucradas en descargas de alta duración. A través de un programa en colaboración con el Instituto de Investigaciones de Transitorios por Descargas Atmosféricas, se determinó cual de los dos tipos de apartarrayos que se utilizaban en el sistema tenía mayor capacidad térmica. Los efectos sobre los interrupciones debidas a fallas en los apartarrayos se muestran en la figura 5.11. En 1967 las interrupciones debidas a este tipo de fallas fueron del 8.81 % del total de las interrupciones. Para 1975 el porcentaje disminuyó a 2.54 % aún cuando la densidad de apartarrayos era mayor.

Desde 1968 se construyen las nuevas líneas usando el máximo espaciamiento entre apartarrayos permitido y a las líneas existentes se les ha instalado en la misma forma la protección necesaria para alcanzar los márgenes adecuados de protección. En una comparación por año de las interrupciones causadas por descargas atmosféricas, mostrada en la figura 5.12 se observa una marcada disminución en el porcentaje total de la mismas.

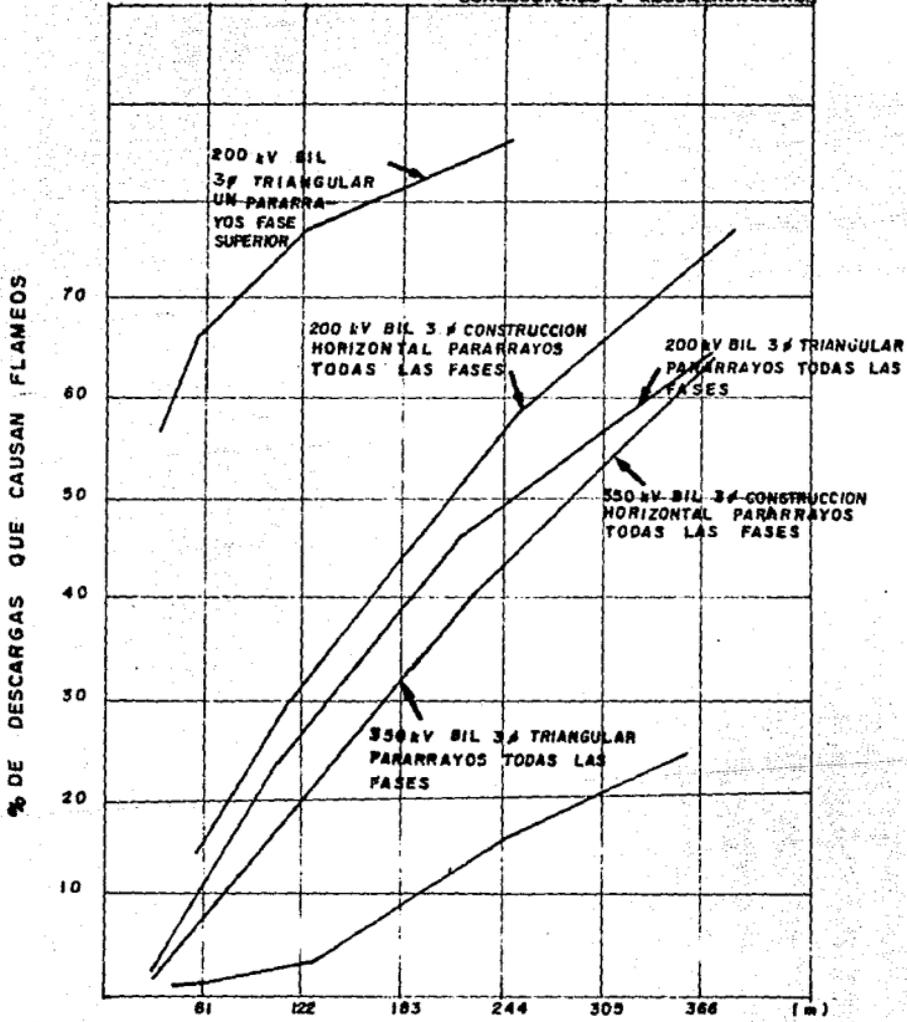


figura S.10. - Descargas atmosféricas que causan flomeos vs. separación entre juego de apartarrayos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

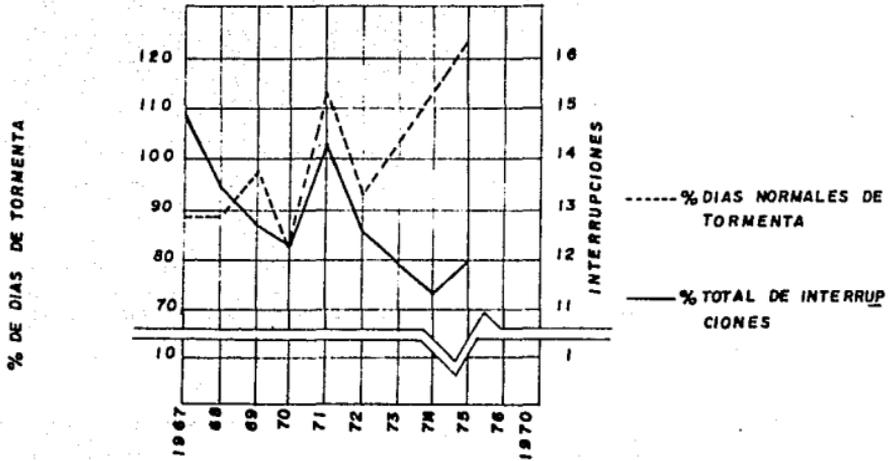


Figura 5.11. - Interrupciones debidas a fallas de apartarrayos.

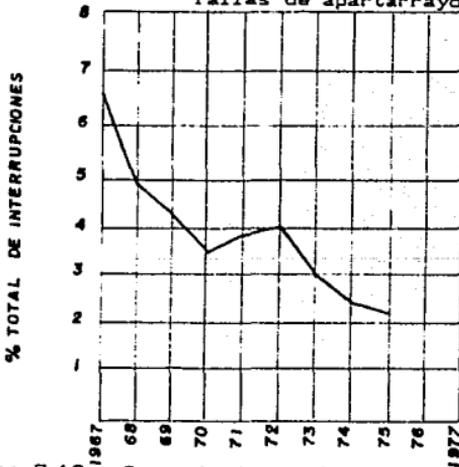


Figura 5.12. - Comportamiento del sistema de distribución de la Florida Power Company.

### 5.3.2.2 Experiencia de la Long Island Lighting Co.

La experiencia de esta compañía en proteger sus redes de distribución contra sobretensiones por descargas atmosféricas ha sido excelente. Durante los últimos 10 años, de 1970 a 1980, se ha atribuido un porcentaje menor del 10 % de interrupciones forzadas en su sistema por descargas o fallas en sus apartarrayos.

La política técnica de esta compañía en lo que se refiere a la protección contra descargas atmosféricas de sus equipos, se refleja en sus "Especificaciones para prueba y adquisición de equipo eléctrico" y en sus "Normas de construcción". En estas se contempla un NBI mínimo de 95 KV para equipo de distribución y la obligatoriedad de la instalación de apartarrayos en todos los equipos de redes aéreas, tales como transformadores de distribución, banco de capacitores, seccionadores e interruptores. Los apartarrayos instalados en el transformadores autoprotegidos están en paralelo con la boquilla de alta tensión y conectados al neutro común. Todos los demás apartarrayos se conectan lo más cercano posible a los equipos que se desean proteger. El tipo de apartarrayos que se utilizan en esta compañía es el autovalvular, clase distribución, de 10 KV para los circuitos de 13.2 KV y de 3 KV en los circuitos de 4.16 KV; en zonas de alta contaminación se utilizan apartarrayos con porcelanas para 18 KV.

Para proporcionar una baja resistencia en las tomas de tierra, todos los apartarrayos se conectan a un neutro común, utilizando electrodos de varilla de cobre revestido de acero de diámetro de 5/8 de pulgada y 10 pies de largo (Cooperweld), o bien utilizando placas de cobre, enterradas en ambos casos. El neutro está interconectado y se considera continuo en todo el sistema, incluyendo:

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) En todos los puntos donde se tiene una línea aérea.
- b) En todas las retenidas.
- c) En todas las acometidas, a través de tuberías de agua o de varillas enterradas.
- d) En todos los lugares donde se tienen instalaciones subterráneas, a través del neutro concéntrico del cable.
- e) En todos los puntos de la red aérea en donde se conecten servicios subterráneos, en bóvedas y en locales en donde se instala equipo eléctrico.

Probablemente el factor más significativo que se toma en cuenta para lograr una buena protección contra sobretensiones es la densidad de apartarrayos en el sistema. En promedio, esta compañía tiene un apartarrayos por cada 800 pies de conductor primario. Esta densidad varía desde un apartarrayos por cada 120 pies de conductor primario de zonas comerciales densamente pobladas, a un apartarrayos por cada 1200 pies en zonas rurales poco pobladas. En áreas remotas del sistema, que están sujetas a una actividad atmosférica mayor de lo habitual en las antes mencionadas, se instalan mayor número de apartarrayos para lograr así igualar el comportamiento del resto del sistema.

Otro factor que contribuye a mantener un buen comportamiento de la protección contra descargas atmosféricas es el procedimiento de prueba establecido para los apartarrayos que se utilizarán. Antes de reconectar todos los apartarrayos que se han retirado del sistema para darles mantenimiento, pasan por una prueba de corriente directa, consistente en medir su corriente de fuga (aprox. 7 microamperes) ante una tensión de corriente directa de 15 KV para apartarrayos de 10 KV. Este valor de la corriente de fuga difiere en relación al diseño del fabricante de estos dispositivos entre un rango de 7 y 500  $\mu$ A.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un factor más que contribuyó al mejoramiento de la protección de este sistema de distribución, son también los trabajos que se llevaron a cabo para disminuir los valores de las resistencias de la toma de tierra. Durante la década de los sesentas, en la parte Oeste de la zona de suministro de esta compañía, se efectuó un programa orientado a mejorar la calidad de las conexiones a tierra de los hilos de guarda de las líneas de 13, 33, 69 Kv, debido a que estas presentaban un alto índice de fallas, logrando reducir los valores de resistencia de las tomas de tierra a valores de 25 Ohms o menos al conectar dos o más electrodos en paralelo en los puntos donde se hacía necesario. Estas labores ayudaron también a lograr un buen comportamiento de la protección contra descargas atmosféricas cuando se instalaron apartarrayos.

## B I B L I O G R A F I A

'Análisis de Diferentes aspectos en la coordinación de Aislamiento en Redes de Distribución' F.Hernández Cortés, RVP-89-DIS-06 IEEE México Julio 1989.

'Análisis del Comportamiento de los Elementos del Esquema Apartarrayos-Cortacircuito-Transformador' F.de la Rosa Castilla, J.Almaráz Gómez, J.A.Cemillo Ramírez, D.Guajardo, D.Serrano, L.M.Sánchez,RVP-89-DIS-03 IEEE México Julio 1984.

'Aplicación de Pararrayos en Sistemas de Distribución' Memotec 4, Condomex, México.

'Diseño de Subestaciones Eléctricas' J.Raúl Martín, Ed. McGraw Hill,México D.F. 1987.

'Distribution System Protection Using MOV Surge Arresters' W.D. Niebuhr,Power Systems Group,Mc Graw-Edison Company 1981

'Electrical Transmisson and Distribution Reference Book' Westinghouse Electric Corp.,Capítulo 10 'Grounding of Power System Neutrals'S.B.Griscom.

'Estaciones Transformadoras y de Distribución'G.Zoppetti Judez. Ed.G Gili, Barcelona España 1972.

'Estudio Experimental de Nuevas Alternativas de Protección Contra Sobretensiones en Líneas de Distribución'F.de la Rosa Castilla, R.Torres López, RVP-89-DIS-01 IEEE México, Cuernavaca Mor. Julio 1989.

'Ferroresonance. Notes On Its Occurrence and Control in Distribution Networks' A. Baitch, Sydney Australia, Agosto 1984

'Fluctaciones Transitorias de Voltaje en Sistemas de Distribución Provocadas por la Operación de Hornos Electricos de Arco' V. E. Dominguez, O. Cejudo A., J. R. Ramirez G., Boletín IEEE Mayo/Junio 1982.

'IEEE Guide for Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating Current Systems'.  
ANSI/IEEE, Std. C62.2-1987.

'IEEE Guide for Safety in Alternating-Current Substation Grounding' No. 80.

'Investigation of Lightning Damages on Distribution Lines'  
K. Uehara, G. Ohwa, IEEE Vol 87, No 4, Abril 1984.

'Lightning & Overvoltage Protection' M. Darveniza, Electrical Engineer, Marzo 1989.

'Lightning Strikers and the Protection of Sensitive Equipment'  
R. Barlow., Electrotechnology, Julio 1988.

'Manual Técnico de Cables de Energía' V. Sierra Madrigal,  
A. Sansores Escalante, Ed. Mc Graw Hill, México 1984.

'Natural and Artificially-Initiated Lightning and Lightning Test Standards' M. A. Uman, Fellow, IEEE Vol 78, No 12. Diciembre 1988

'Protección de las Instalaciones de Baja Tensión con Aparatos Electrónicos Frente a Sobretensiones' P. Hasse, Referencia M-388, IEEE México 1990.

"Protección de Transformadores de Distribución" Subcomité de Transformadores, Comité de Distribución y Transmisión Subterránea, IEEE México 1985.

"Protecting Against Lightning with Surge Arresters" R. Gordon Black, EC M, Diciembre de 1983.

"Proyecto de Construcción de un Medidor de Resistencia a Tierra" E. Barcenas, C. Covarrubias, RVP-89-DIS-16 IEEE México Julio 1989.

"Puestas a Tierra de Sistemas Eléctricos. Análisis y Recomendaciones sobre Métodos y Materiales" J. E. Barcia, Electrotecnica, Rosario Argentina Marzo/Abril 1981

"Redes de Distribución de Energía Eléctrica. Protección contra Sobretensiones" J. Yebra Morron, Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Curso de Actualización, Veracruz, Ver. Febrero 1983.

"Redes Eléctricas" J. Viqueira Landa, Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, Vol. II, México D.F. 1986

"Sistemas de Tierras en Redes de Distribución" G. López Monroy, López Gallegos, Gerencia de Distribución de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, México 1989.

"Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica" C. Luca Marín, Ed. Avance, México D.F.

"Primer Seminario sobre Diseño de Sistemas Subterráneos de Distribución", Capítulo 4. R. Espinoza y Lara, CLYFCSA, México 1987.

**''Protección de las instalaciones de baja Tensión con Aparatos  
Electrónicos Frente a sobretensiones'' P.Hasse, Referencia M-368, IEEE  
México 1990.**