



DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LOS SISTEMAS  
ELECTRICOS DE POTENCIA

TESIS PROFESIONAL

GERARDO ROQUE VISCENCIO

México, D. F.

1967

*A mis padres y hermanos*

A mis tios

1099

FACULTAD DE INGENIERIA  
Dirección  
Núm. 73-  
Exp. Núm. 73/214.2/1.-



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE  
MEXICO

Al Pasante señor Gerardo Roque Viscencio  
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el señor profesor Ingeniero Humberto Rodríguez y C., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero MECANICO ELECTRICISTA.

DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LOS SISTEMAS  
ELECTRICOS DE POTENCIA

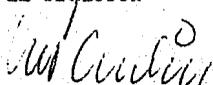
"El estudio deberá comprender los siguientes puntos:

1. Introducción.
2. Medición de las características de las descargas atmosféricas.  
Método aplicado en el Sistema Eléctrico Occidental
3. Sobrevoltajes y su propagación en las líneas de transmisión.
4. Protección de las líneas de transmisión y de las estaciones."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F. 20 de Octubre de 1967  
EL DIRECTOR

  
Ing. Manuel Paulín Ortiz

MPO:MMO: eag.

  
671223.

## P R O L O G O .

ES MUY BIEN CONOCIDA POR TODOS NOSOTROS LA IMPORTANCIA QUE EN LA ACTUALIDAD HA ALCANZADO EL SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA PARA LOS DIFERENTES PROCESOS INDUSTRIALES, COMERCIALES Y DOMESTICOS. ESTO LO PODEMOS VER REFLEJADO EN LA ECONOMIA DEL PAIS; DE AQUI LA NECESIDAD DE QUE CONTINUAMENTE SE ESTEN REALIZANDO ESTUDIOS ECONOMICOS PARA APROVECHAR AL MAXIMO LOS RECURSOS NATURALES DISPONIBLES. YA SEA PARA INSTALAR PLANTAS TERMOELECTRICAS, HIDROELECTRICAS Y NUCLEARES, PARA PODER SATISFACER LAS NECESIDADES DE DEMANDA DE LA ENERGIA ELECTRICA.

ESTA DEMANDA CRECIENTE DE LA ENERGIA ELECTRICA HA TRAJIDO COMO CONSECUENCIA LA INTERCONEXION NO UNICAMENTE DE PLANTAS ELECTRICAS SINO DE SISTEMAS. DE AQUI QUE CUANDO OCURRE UN DISTURBIO DE IMPORTANCIA NO AFECTA UNICAMENTE LA SECCION DEL SISTEMA EN LA CUAL SE PRESENTA, SINO QUE TAMBIEN SE REFLEJA EN TODO EL SISTEMA. UNA DE LAS PRINCIPALES CAUSAS QUE PROVOCAN INTERRUPCIONES FRECUENTES EN EL SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA SON LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS CON SUS EFECTOS EN LAS LINEAS DE TRANSMISION. EXISTEN REGIONES DEL PAIS EN LAS QUE SU INFLUENCIA ES MUY NOTORIA, YA QUE ES EL PRINCIPAL FACTOR QUE PRODUCE DISTURBIOS DE IMPORTANCIA CON CORTES DE ENERGIA, SEGUN DATOS ESTADISTICOS.

PARA DAR A CONOCER AUNQUE SEA BREVEMENTE LAS MEDIDAS QUE SE ESTAN TOMANDO EN NUESTRO PAIS PARA DISMINUIR O EVITAR LOS EFECTOS DE ESTE FENOMENO METEOROLOGICO, A CONTINUACION EXPONGO UN SOMERO ESTUDIO AL RESPECTO, EL CUAL EMPEZO A REALIZARSE ESTE AÑO POR PARTE DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA INDUSTRIA ELECTRICA DEPENDIENTE DE LA C. F. E. ESPERANDO QUE SEA DE INTERES PARA EL LECTOR.

## C A P I T U L O 1.

### INTRODUCCION

Un sobrevoltaje como su nombre lo indica es una elevación repentina del voltaje de operación continua de un Sistema Eléctrico de Potencia, su aislamiento está seleccionado para soportar su tensión de operación constante. Para que la aplicación del aislamiento sea lo más económico posible, el sobrevoltaje deberá ser restringido lo más rápido posible dentro de lo razonable.

Si al Sistema se le aplicara un aislamiento tal que pudiera soportar tales sobrevoltajes se nos presentan los siguientes inconvenientes:

Un costo elevado.

Cadenas de aisladores más voluminosas.

Por estas razones no es posible proteger a un Sistema de Potencia con el aumento de su aislamiento, ya que aumentaría el costo inicial de la instalación enormemente, esto por una parte, por otra se presenta que el peso de las cadenas de aisladores aumentaría tanto que sería necesario emplear soportes de mayor capacidad.

Se ha encontrado un dispositivo tal que su nivel básico de aislamiento es el mismo del de las cadenas de aisladores, ya que en operación normal el dispositivo trabaja como aislador y presenta una trayectoria de una impedancia muy grande, este dispositivo recibe el nombre de Apartarrayo.

La función del Apartarrayo es la de limitar la elevación del voltaje entre sus terminales a un valor que es algo mayor del voltaje de operación de la línea en la cual se encuentre colocado. Cuando el voltaje en las terminales del Apartarrayo llega a un valor crítico, su función es la de evitar una mayor elevación, para esto entonces permite el paso de grandes corrientes con un incremento un poco mayor en su voltaje, cuando el voltaje llegue a normalizarse el Apartarrayo deberá cortar el flujo de la corriente, porque de no ser así se presentaría una trayectoria franca a la corriente y estaríamos en el caso de una falla a tierra del Sistema, la cual nos quita la continuidad del servicio eléctrico, ya que ésta es el principal adjetivo que caracteriza a los Sistemas Eléctricos de Potencia.

Se ha visto que las principales causas de los sobrevoltajes pueden ser de:

- I.- De origen interno.
- II.- De origen externo.

Se entiende por sobrevoltajes de origen interno a aquellos que se producen por condiciones propias del Sistema. Mientras que los sobrevoltajes de origen externo tienen su origen fuera del Sistema que estamos analizando.

Los principales sobrevoltajes de origen interno son:

- 1.- Sobrevoltajes de frecuencia normal producidos por cortos circuitos.
- 2.- Sobrevoltajes debidos a fenómenos de resonancia.
- 3.- Sobrevoltajes transitorios debidos a operación de interruptores y a cambios bruscos del Sistema.

Los sobrevoltajes de origen externo son aquellos que se

producen por una descarga atmosférica ya sea directa o indirectamente a las líneas o torres de transmisión.

En este caso se estudiarán principalmente los sobrevoltajes de origen externo. Empezando por analizar las posibles causas de las descargas atmosféricas, las principales teorías que se han elaborado acerca de la formación de los campos electrostáticos en las nubes, ya que éstos son la fuente directa de las descargas atmosféricas.

A continuación tenemos una breve relación de las teorías que tratan de explicar la formación del campo electrostático en las nubes, estas teorías estuvieron muy en boga hace más de 20 años, pero las cuales aún nos sirven de guía para comprender el mecanismo de la formación del campo electrostático que se realiza en una nube, el cual es la base del fenómeno meteorológico conocido como descarga atmosférica.

Una de estas teorías se basa en que en el espacio existe un cierto número de iones positivos y negativos los cuales tienen un movimiento al azar, el cual tiene un valor comprendido entre 0.0003 y 0.0005 Cm./Seg., este movimiento es producido por un gradiente de potencial de 1 Volt/Cm., este gradiente de potencial se supone que existe aún en tiempo despejado, dirigiéndose hacia la tierra. Si una nube se encuentra dentro de tal campo, en el momento en que una gota de agua se condense y caiga por acción de la gravedad se polarizará por inducción del campo electrostático existente como se muestra en la Fig. siguiente en donde el campo está dirigido hacia abajo, esto supone que la tierra tiene una carga negativa en su superficie.

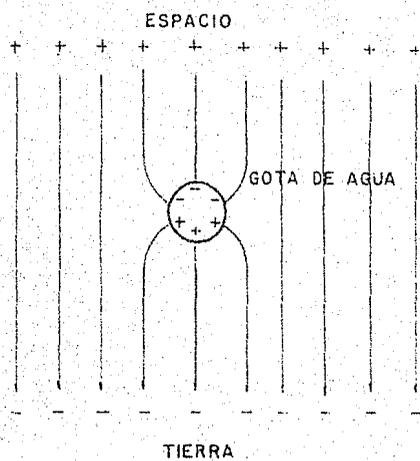


FIG. 1

Como la dirección del campo electrostático es hacia abajo, la parte superior de la gota de agua adquiere una carga negativa y la inferior una carga positiva. Al ir cayendo la gota de agua su porción inferior atrae a los iones negativos que se encuentra a su paso, con lo cual la gota de agua va acumulando una carga eléctrica negativa. La parte superior de la gota no sufre ningún cambio.

Existen también gotas de agua de un tamaño menor que las anteriores las cuales caen con menor rapidez, éstas adquieren una carga positiva con el impacto de los iones positivos que quedan en el espacio.

Debido a lo anterior las gotas de mayor tamaño hacen que la porción inferior de la nube se cargue negativamente y la superior debido a la presencia de las gotas pequeñas se cargue positivamente. Con esto, la carga que existía al azar es separada en la forma antes indicada.

De esta manera como se explica la formación del campo electrostático en una nube según la teoría desarrollada por -- C.T.R. Wilson.

La otra teoría que analizaremos explica la formación de un campo electrostático en una nube basándose en que algunas gotas de agua de un tamaño determinado (0.25 Cm.) al caer alcanzan una velocidad de 8 M/Seg., ahora si en un momento dado una corriente de aire ascendente de igual velocidad se presente a la nube, las gotas de agua se detienen y se forma así una zona estática dentro de la nube. Si las gotas de agua caen dentro de tal zona se separan en otras más pequeñas pero cuando esto se realiza el aire con el que chocan se electriza por frotamiento adquiriendo una carga negativa, las gotas pequeñas adquieren -- por lo tanto una carga positiva, se reagrupan y forman otras de un tamaño mayor cayendo otra vez con lo cual se repite el ciclo, pero con la indicación de que las gotas van adquiriendo una carga positiva cada vez mayor, formando así un centro de carga altamente positiva.

El aire ascendente que lleva la carga eléctrica negativa, cede ésta a las partículas que se encuentran en la parte superior de la nube, y también a casi todo el cuerpo de la nube.

De lo anterior podemos suponer que la nube se carga eléctricamente en la forma siguiente:

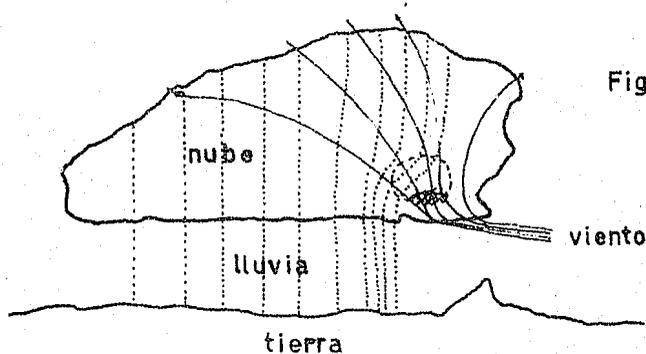


Fig. 2

Debido a lo anterior la densidad de carga eléctrica negativa es mayor en la parte superior de la región de separación de la carga.

En cierta forma existe una contradicción en las dos teorías ya que la primera de ellas nos indica que la parte superior de la nube adquiere una carga positiva y la inferior una carga negativa; la segunda nos indica que en la parte inferior de la nube existe un centro de carga positiva y el resto de la nube toda ella tiene carga negativa. Bajo tales circunstancias se realizaron experimentos para determinar las condiciones en que se encuentra la carga eléctrica dentro de una nube. Tales experiencias reportaron que en la parte superior existía una carga positiva y que el cuerpo principal de la nube tenía una carga negativa, en algunos casos se encontró que existía una carga positiva en la parte inferior de la nube.

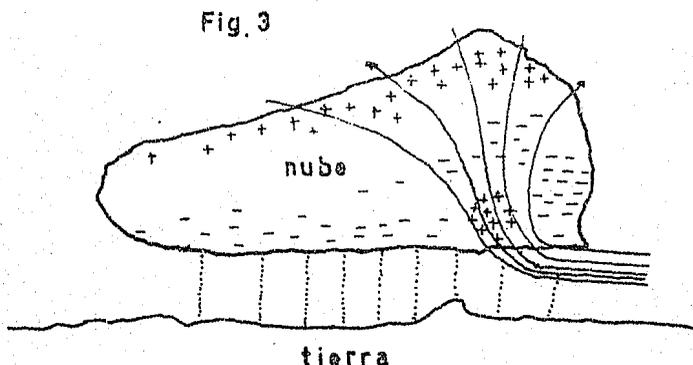
Una comprobación de lo anterior es que al paso de una nube electrizada se pudo medir con balones meteorológicos el gradiente de potencial y se encontró que el campo electrostático estaba dirigido hacia la nube o sea que la parte inferior de la nube tenía carga negativa.

De lo anterior podemos decir que la primera teoría se acerca un poco más a la realidad, únicamente que no puede explicar la presencia de centros de cargas positivas en la parte inferior de las nubes. Además tenemos que en la parte superior de una nube la temperatura es menor a los  $-10^{\circ}\text{C}$ . lo cual nos indica la existencia de gotas de agua congeladas las cuales se transforman en cristales de forma de placas y de agujas, se sabe por otro lado que el hielo es un cuerpo no conductor y no se puede polarizar, además que su movimiento es más lento que el aire y también que se realiza casi horizontalmente, esto nos hace pensar que la electrización de la parte superior de la nube no es muy posible de realizarse. Pero como una contradicción de esto se han registrado tormentas de nieve en las cuales después que

terminan se han podido medir campos eléctricos positivos, lo cual solo es posible si el aire se electriza positivamente y la nieve negativamente cuando cae a la superficie de la tierra, esto es una comprobación de que los cristales de hielo si se pueden polarizar.

De todo lo anterior vemos que está un poco confusa la descripción de la formación de la carga positiva en la parte superior de las nubes, ya que no se ha podido comprobar a satisfacción la explicación anterior.

Se ha elaborado una combinación de las dos teorías anteriores la cual se ha plasmado en la Fig. 3 en donde se muestran las tres regiones de centros de carga, o sea que en la parte superior de la nube tenemos separación de la carga positiva de la negativa, la cual se realiza en temperaturas inferiores a los  $-10^{\circ}\text{C}$ , y en la inferior, la formación del centro de carga positiva, se realiza a una temperatura superior a la de congelación.



Resumiendo podemos decir que de las teorías anteriores que tratan de explicar la formación de la carga en las nubes no son completas ya que tienen muchos puntos confusos los cuales -

no se han podido aclarar; pero que de una forma u otra se realiza la separación de la carga eléctrica en las nubes.

De los experimentos mencionados anteriormente se obtuvo como dato que la magnitud del gradiente de potencial fué de unos 100 V/cm., en algunas partes la magnitud de este gradiente fué excedido, dichas partes son de una gran actividad eléctrica. Pero en general podemos tomar como común el gradiente de 100 V/cm. entre la nube y tierra. De tal manera que para una nube que tenga una altura de unos 1000 Mts. la diferencia de potencial entre la nube y tierra será de M.V., se cree que en las regiones de la nube de alta distribución de carga es probable que la diferencia de potencial sea de 20 M.V.

Todo lo anterior que se realiza en las nubes, precede a las descargas atmosféricas, ahora pasaremos a estudiar el mecanismo de la descarga propiamente dicha. Como ya se vió que el gradiente entre la nube y la tierra no puede exceder a los 100 V/cm. Con este valor no se rompe el dieléctrico que es el aire, por lo que la descarga deberá tener su origen en la propia nube. Esto es debido a que se ha determinado que el gradiente crítico disruptivo en el aire sin gotas de agua es de 30 KV/cm. Estos valores se encuentran en la nube, de ahí se justifica que la descarga sea iniciada en la nube. La presión atmosférica influye en el valor del gradiente crítico disruptivo.

El mecanismo de la descarga atmosférica ha sido explicado por medio de los datos obtenidos por Schonland. Estas aportaciones se complementaron con las fotograffas logradas por medio de una cámara especial la cual nos proporciona dos fotos distorsionadas del rayo al cual hayan fotografiado, las cuales, si se superponían se podía obtener la dirección y la velocidad de propagación del rayo.

Cuando ocurre una descarga atmosférica nos parece que es un simple destello, lo cual no es completamente cierto, ya que en realidad tiene una cierta cantidad de componentes, los cuales bajan de la nube por la misma trayectoria inicial, como el tiempo de cada uno de ellos es muy corto es una ilusión óptica el verlos como un solo rayo, los componentes se suceden consecutivamente uno a otro. Por medio de la cámara descrita anteriormente se pudo comprobar lo anterior. El mecanismo de la descarga lo podemos enunciar de la siguiente manera.

Al ser el gradiente entre la nube y la tierra mayor que el gradiente crítico disruptivo por las condiciones existentes, aparece desde la nube un componente al cual le sigue lo que se le ha llamado *gallardete piloto*, este es el que abre camino en el aire ionizándolo para que fluya la corriente de descarga.

La existencia del *gallardete piloto* se dedujo por el mecanismo de la descarga. Le preceden al *gallardete* unos puntos luminosos los cuales siguen una trayectoria recta escalonada, de allí que reciban el nombre de *guías escalonadas*, nada más con la indicación de que se desplazan siempre en una dirección diferente lo cual hace ver su conjunto como distorsionado; el tronco principal del rayo tiene además efluvios los que le dan al rayo su forma característica. Se ha podido determinar la velocidad con que se realizan cada uno de los acontecimientos anteriores, la velocidad con que se mueve el *gallardete piloto* es de unos 150 Km/seg., la de los *guías escalonados* es mayor del orden de 50,000 Km/seg. Al llegar a la tierra el rayo, aparece un *gallardete* muy brillante el cual regresa a la nube por la misma trayectoria esto lo podemos ver en las figuras 4 y 5, después que el *gallardete* anterior llega a la nube sigue fluyendo por la trayectoria ionizada una corriente; dentro de la nube aparecen otros *gallardetes* entre los centros de carga.

Fig. 4

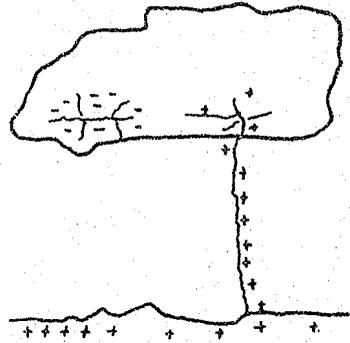
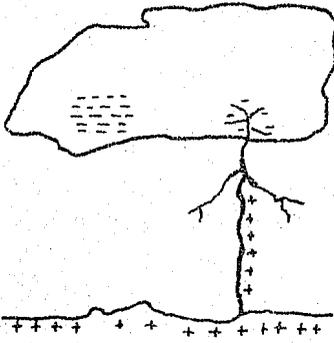
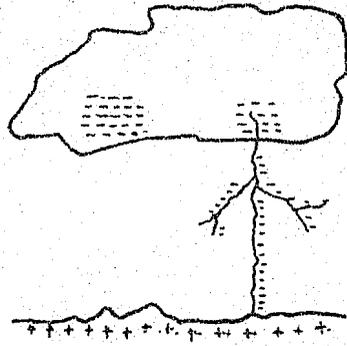
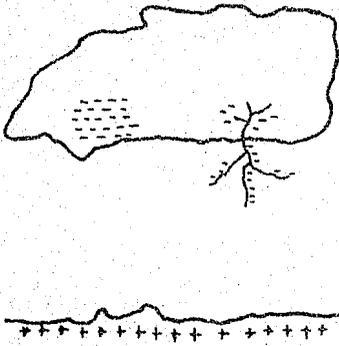
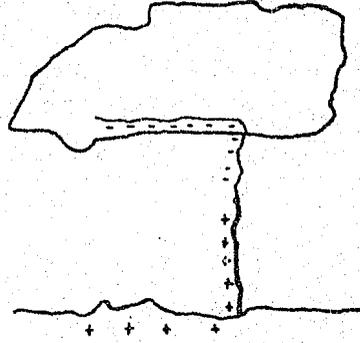
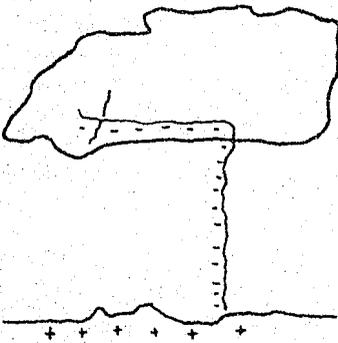


Fig. 5



Después que el fallardete de retorno llega a la nube, tenemos que el potencial del centro de carga eléctrica en donde se inició la descarga se baja considerablemente, lo cual hace -- que se produzcan grandes diferencias de potencial entre los centros de carga de la nube como se muestra en la figura 5. Produciéndose de esta manera descargas entre dichos centros, continuándose hasta la tierra por la misma trayectoria hecha por el primer fallardete; este último fenómeno se <sup>electiva</sup> ~~afecta~~ sin que tenga ramificaciones o efluvios y se realiza a una velocidad mayor -- que cuando empezó la descarga. Como no tiene las ramificaciones características, se le ha llamado dardo guía, y cuando llega a la tierra, se repite el ciclo con una descarga de retorno de la tierra a la nube.

Si existen más centros de carga en la nube puede repetirse el ciclo anterior, de ser así se presenta lo que se ha denominado como descarga múltiple.

Lo que si se ha podido comprobar plenamente es que el gradiente en el espacio tiene un valor promedio de  $1 \text{ V/cm}$ , con lo cual se reafirma la teoría de Wilson. Cuando pasa una nube -- cargada por un punto determinado, en donde tenemos un aparato -- el cual nos registra el campo eléctrico vemos que en el momento en que la nube se acerca, el gradiente positivo aumenta, esto -- se explica por la presencia de la carga positiva en la porción superior de la nube, si queda dicho punto en la parte media de la nube el gradiente ha disminuido y quizás hasta cambiado de -- sentido por el predominio de la carga negativa en la porción inferior de la nube; el valor del gradiente en esta parte es cuando mucho de unos  $100 \text{ V/cm}$ . Pero cuando ocurre una descarga la -- distribución de la carga se complica tanto que no es posible definir que distribución adquiere.

Resumiendo, tenemos las teorías anteriores las cuales nos explican la formación del campo electrostático en la nube

be, también el mecanismo de las descargas atmosféricas, la velo ci dad y el tiempo en que ocurren, la forma en que varía el gra d iente en el espacio entre la nube y la tierra. Con esto es su f iciente como herramienta para comprender y tratar de explicar la forma como se determinan sus características, las cuales son: Su velocidad, su intensidad en amperes, su intensidad en volts, la forma como se propagan las ondas de sobrevoltaje en las lí neas de transmisión cuando las descargas caen directamente so bre ellas o cuando también se producen en ellas sobrevoltajes, inducidos por la presencia de las nubes cargadas electricamen te.

En el siguiente capítulo se analiza el método emplea do en México por el Instituto de Investigaciones de la Indus tria Eléctrica para determinar dichas características las cu ales nos indican si el equipo de protección instalado en el Sis tema es el adecuado o si su capacidad es suficiente para po der ab atir el sobrevoltaje de la línea y evitar de esta manera que dicho sobrevoltaje se nos pase hasta un transformador o a un ge nerador cosa que sería altamente desastrosa.

## C A P I T U L O II.

### MEDICION DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS. METODO APLICADO EN EL SISTEMA ELECTRICO OCCIDENTAL.

En la División Centro Occidente de la C.F.E. principalmente en las regiones de Uruapan, Carapan, en el Edo. de Michoacán, en las principales Hidroeléctricas del sistema Lázaro Cárdenas como son las Hidroeléctricas del Cóbano y de Cupatitzic, dadas sus características meteorológicas se ha puesto en práctica un método para determinar las características de las descargas atmosféricas, este método se ha empleado ampliamente en Europa principalmente en Alemania.

El Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica ha estado aplicando en vías de experimentación el método antes mencionado en las instalaciones del Sistema Hidroeléctrico Occidental, ya que como dijimos anteriormente estas se encuentran en regiones donde la incidencia de las descargas atmosféricas es muy notable. Con este método la característica que determinamos de inmediato es el valor de la intensidad de la corriente de descarga y conociendo el valor de la resistencia de la torre por la que bajó, y la resistencia de la tierra en la que está enclavada podemos determinar el valor del sobrevoltaje que se presenta al aislamiento.

La base fundamental del método radica en el campo magnético que se produce por el paso de la corriente de descarga por un conductor. Para lo cual recordaremos un poco la forma como se presenta el campo magnético producido por el movimiento de una carga eléctrica. También el método se basa en el magnetismo que adquiere cierto material que se ha expuesto al campo magnético anterior, el material guarda por decirlo así un recuerdo del valor de la intensidad del campo magnético y como este es proporcional a la corriente que la produce, tenemos un ma

terial que nos graba el valor de la intensidad de la corriente de una descarga atmosférica.

El material mencionado se tiene en unos recipientes de vidrio, los cuales reciben el nombre de Probetas Magnetizables. Cuando una de estas probetas se ha expuesto al efecto de un campo magnético producido por una descarga, se analiza por medio de un dispositivo especial el cual por medio de magnetizaciones y desmagnetizaciones se determina el magnetismo remanente de la probeta y con este valor y la curva magnetización del material podemos determinar el valor máximo o de cresta de la corriente de descarga.

Como se mencionó anteriormente que la base principal del método es el campo magnético que produce una corriente eléctrica al pasar por un conductor. Por lo que a continuación se analiza el campo magnético que produce una corriente que circula por un conductor.

Este método se aplica en México por su sencillez y principalmente por lo económico que es, ya que nos permite colocar una cantidad considerable de probetas, con lo cual se tiene la confianza de que alguna de ellas podrá reportarnos alguna información al respecto.

Supongamos que tenemos un conductor recto el cual lo podemos imaginar que está dividido en unos pequeños elementos  $dl$ , en dicho conductor circula una corriente de intensidad  $i$ , este elemento de acuerdo con la ley de Ampere crea un campo magnético concéntrico al conductor, el elemento nos produce un campo de intensidad igual a  $\frac{dB}{r}$  como se indica en la figura 7.

La magnitud de la densidad del campo magnético está dada por la siguiente expresión que se le ha dado también el nombre de Ley de Ampere.

$$dB = K' \frac{i \, dl \, \text{sen } \theta}{r^2}$$

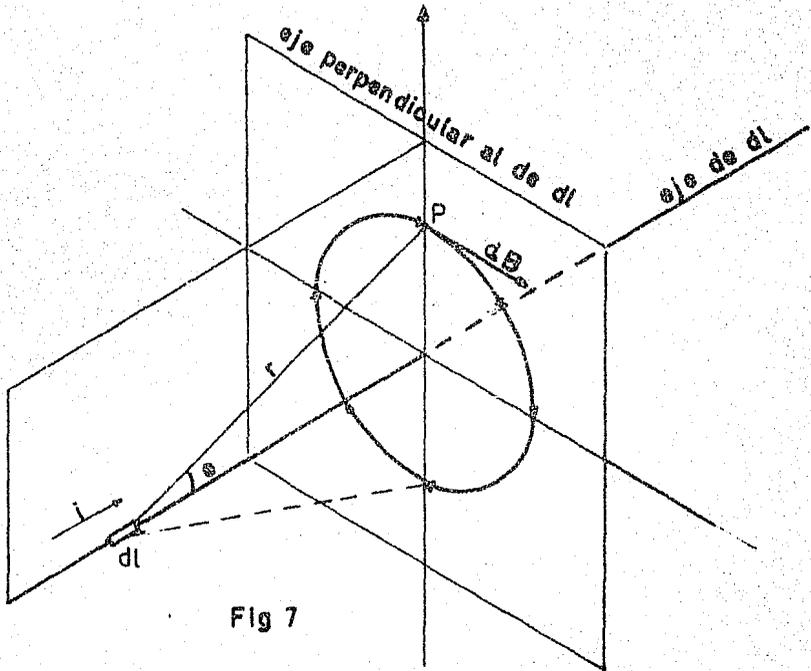
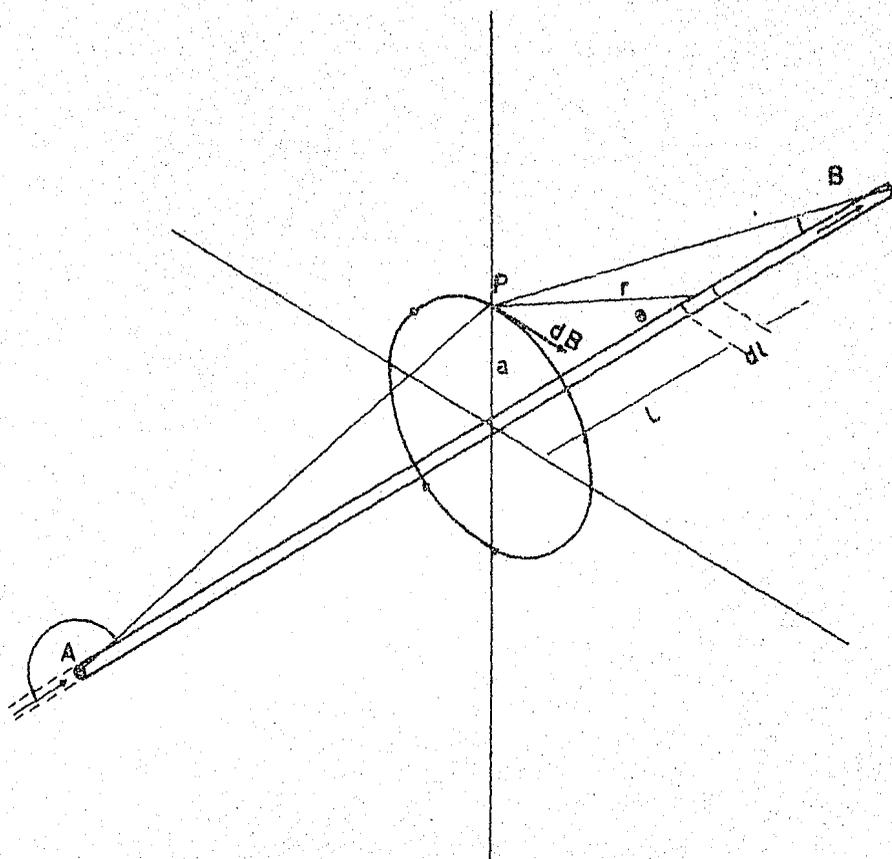


Fig 7

En donde la densidad del campo magnético es directamente proporcional a la intensidad de la corriente e inversamente al cuadrado de la distancia del punto al elemento que produce el campo magnético. En la expresión anterior

$$K' = \frac{\mu_0}{4 \pi}$$

$$\mu_0 = \text{Permeabilidad del vacío} \frac{\text{Newton-Seg}^2}{\text{Coulomb}^2}$$



U N A M	Tesis Profesional	F I
	CAMPO CREADO POR UN CONDUCTOR RECTI LINEO	
Fig 8	GERARDO ROQUE V	1967

De la fórmula I-1 podemos decir que la densidad de campo es nula para el ángulo  $\theta = 0^\circ$  y máxima para  $\theta = 90^\circ$  y es en el plano que pasa por el elemento  $dL$ .

Integrando

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{idL \sin \theta}{r^2} \quad (I-2)$$

Teniendo en cuenta que esta integral es una integración vectorial.

Ahora supongamos que tenemos un punto P a una distancia  $a$  del conductor, el campo producido en este punto por cualquier elemento  $dL$  se encuentra en el mismo plano, entonces en la fórmula (I-2) la única variable que tenemos es el ángulo  $\theta$ , ya que también la  $i$  es constante. Considerando por otra parte que el conductor tiene una longitud infinita y además de la Fig.8 tenemos:

$$r = a \operatorname{cosec} \theta \quad L = a \cot \theta$$

$$dL = -a \operatorname{cosec}^2 \theta d\theta$$

Substituyendo en la fórmula I-2 los valores anteriores tendremos:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_A^B \left( \frac{-a \operatorname{cosec}^2 \theta d\theta}{a^2 \operatorname{cosec}^2 \theta} \right) \sin \theta \\ &= - \frac{\mu_0 i}{4\pi a} \int_A^B \sin \theta d\theta \\ &= \frac{\mu_0 i}{4\pi a} (\cos B - \cos A) \end{aligned}$$

Pero como el conductor es de longitud infinita

$$A=180^\circ \quad B=0^\circ$$

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

I-3

En la fórmula anterior la densidad del flujo es directamente proporcional a la intensidad de la corriente e inversamente proporcional a la distancia del punto considerado al conductor.

Todo lo anterior no es mas que un desarrollo del principio en que se basa el método de las probetas.

Un cuerpo magnetizable como lo es el material contenido en las probetas se coloca a una distancia  $a$  del conductor por el que pasará la corriente de descarga, la cual produce el campo magnético, el cual magnetiza la probeta por inducción. Cuando se tiene conocimiento de que algunas de las probetas instaladas se ha magnetizado se quita de su lugar para analizarla por medio de un dispositivo especial, con el cual por medio de una serie de desmagnetizaciones y de magnetizaciones se determina el magnetismo remanente del material de la probeta y con ayuda de una curva de densidad de flujo contra intensidad de campo magnético podemos determinar el valor máximo de la corriente que pasó por el conductor, el cual es el valor de cresta de la onda que pasó por dicho conductor.

$$\text{Sabemos que } B = \mu_0 H$$

Por lo tanto:

$$H = \frac{i}{2 \pi a} \quad \text{Amp/cm.} \quad (I-4)$$

En donde  $H$  es la intensidad del campo magnético. Como ya se determinó el valor del magnetismo remanente y el valor máximo de magnetización, aplicando la fórmula (I-4) obtenemos el -

valor de la intensidad de corriente de la descarga atmosférica.

Las probetas se colocan en dirección de las líneas de inducción magnética, de manera que las probetas estén sometidas plenamente al efecto de estas.

Ya que el material que tienen las probetas es de un magnetismo remanente alto, la probeta permanece magnetizada después de un impulso de corriente, y el magnetismo remanente es una medida del valor de la intensidad del campo a que fue sometida y con la fórmula I-4 como ya se indicó se obtiene el valor de la corriente.

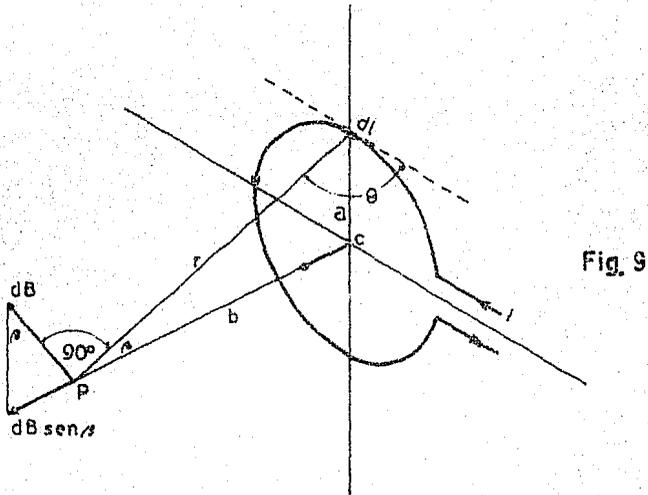
Como se ha visto que en un material magnético las corrientes parásitas atrasan la inductancia producida por un efecto magnetizante impulsivo, anteriormente para evitar esto se empleó para las probetas un hato de alambres de acero a la manera de los rotores laminados para evitar las pérdidas por corrientes parásitas, las probetas de que disponemos tienen como material magnetizable, una clase de polvo de hierro conocido como "Carbonyl" o ferrita sinterizada.

El magnetismo remanente se mide introduciendo la probeta en el interior de una sonda de un medidor de campos magnéticos con esta medimos la intensidad magnética producida por la probeta. Como la intensidad de campo es directamente proporcional al magnetismo remanente de la probeta con lo cual determinamos dicho valor que buscábamos.

La característica de la probeta se determina con el campo de una corriente continua que se produce en el entrehierro de una bobina. La bobina está constituida de tal manera que en el eje se produce un campo homogéneo, que permite el cálculo del factor de proporcionalidad entre la corriente y el campo.

La expresión que nos proporciona el valor del campo magnético en el interior de un solenoide podemos determinarla de la siguiente manera:

Supongamos que tenemos una espira por la que circula una corriente de intensidad  $i$  como lo muestra la Fig. 9.



En el centro de dicha espira la densidad del campo magnético es:

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{idL \text{SEN}\theta}{a^2}$$

Pero en este caso tenemos que  $\theta = 90^\circ$   $\text{SEN}\theta = 1$

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi a^2} \int dL$$

$$\int dL = 2\pi a$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2a}$$

Ahora consideremos un punto colocado en el eje perpendicular a la espira, en dicho punto P vemos que nos quedan únicamente las componentes que son paralelas al eje X, las componentes perpendiculares al eje X se anulan mutuamente entre si, por lo tanto como nada más tenemos las componentes axiales a X estas las podemos integrar algebraicamente.

$$\begin{aligned}
 B_x &= \int dB \sin\theta \sin\beta = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{dl \sin\theta \sin\beta}{r^2} \\
 &= \frac{\mu_0 i \sin\theta \sin\beta}{4\pi r^2} \int dl \\
 &= \frac{\mu_0 i \sin\theta \sin\beta}{4\pi r^2} 2\pi a
 \end{aligned}$$

$$\theta = 90^\circ$$

$$\begin{aligned}
 &\sin\beta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\
 B_x &= \frac{\mu_0 i a^2}{2(a^2 + b^2)^{3/2}} \quad I-5
 \end{aligned}$$

Es el valor de la densidad de campo magnético en un punto que se encuentre en el eje de la espira de radio a y a una distancia b de ella, y por la que circula una corriente de intensidad i.

Pero nuestro caso es el de determinar el campo magnético en el interior de la bobina que usamos para medir el magnetismo remanente de las probetas; la bobina no es <sup>mas</sup> otra que varias espiras unidas entre si. Consideremos una bobina cilíndrica recta como la mostrada en la figura (10).

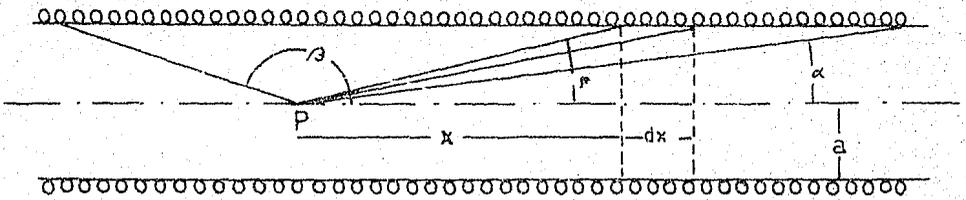


Fig. 10

En cualquier punto la densidad de flujo producida por una corriente que circula por el solenoide no es otra cosa mas que la resultante de las densidades de flujo creadas en dicho punto por cada una de sus espiras. La bobina tiene N espiras y una longitud L, el número de vueltas por unidad de longitud es  $N/L$ , por lo que en un elemento de longitud  $dx$  tenemos:

$$\frac{N}{L} dx \text{ espiras.}$$

De acuerdo con la fórmula (I-5) la densidad de flujo en el punto P producida por el elemento  $dx$  en la figura (10) será igual a:

$$dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{L} \frac{a^2}{(a^2 + x^2)^{3/2}} dx$$

Pero de la figura tenemos que:

$$x = a \cot \phi \quad dx = -a \operatorname{cosec}^2 \phi d\phi$$

$$\frac{a^2}{a(a^2 + x^2)} \frac{a}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{\operatorname{sen}^2 \phi \operatorname{sen} \phi}{a} = \frac{\operatorname{sen}^3 \phi}{a}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{L} \frac{\text{sen}^3 \phi}{a} \quad (-a \text{ cosec}^2 \phi \, d\phi)$$

como  $\text{cosec} \phi = \frac{1}{\text{sen} \phi}$

$$dB = - \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{L} \text{sen} \phi \, d\phi$$

$$B = - \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{L} \int_{\beta}^{\alpha} \text{sen} \phi \, d\phi$$

$$= \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{L} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

En el centro de la bobina tendremos

$$\cos \alpha = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} \sqrt{L^2 + d^2}}$$

$$\begin{aligned} \cos \beta &= \cos (180^\circ - \alpha) = \cos 180^\circ \cos \alpha + \text{sen} 180^\circ \text{sen} \alpha \\ &= - \cos \alpha \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{L} \left( \frac{L}{\sqrt{L^2 + d^2}} + \frac{L}{\sqrt{L^2 + d^2}} \right)$$

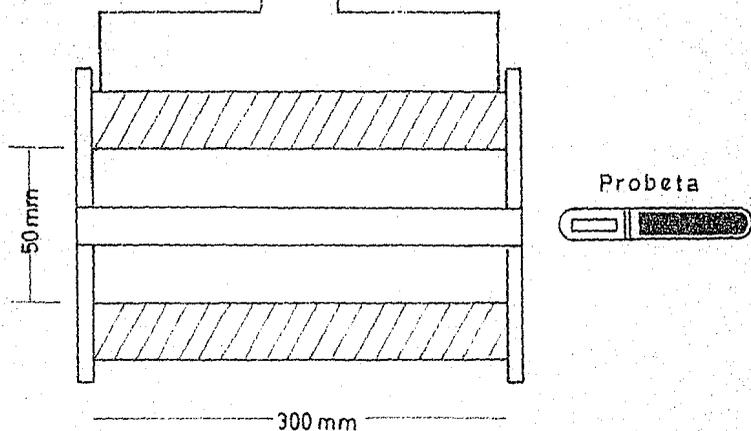
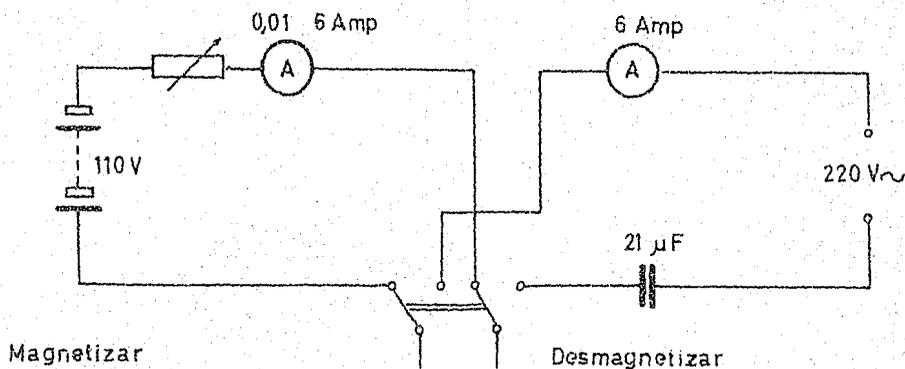
$$B = \frac{\mu_0 Ni}{\sqrt{L^2 + d^2}} = \frac{\mu_0 Ni}{L \sqrt{1 + \left(\frac{d}{L}\right)^2}} \quad (\text{I-6})$$

En donde L= Longitud de la bobina.

d= Diámetro de la bobina.

N= Número de vueltas de la bobina.

La expresión I-6 nos proporciona el valor de la densidad y por extensión de la intensidad del campo magnético en el centro de la bobina. Por medio de esta se determina la curva de magnetización del material de la probeta.



INTENSIDAD DE CAMPO  $H = 150 I$  Amp/cm

Bobina

4708 vueltas

Alambre calibre # 16 AWG

U N A M	Tesis Profesional	F I
	DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA CURVA DE MAGNETIZACION DE LAS PROBETAS	
Fig.11	GERARDO ROQUE V	1967

La bobina deberá tener un diámetro bastante grande -- para que al introducir la probeta magnetizada en su entrehierro no se distorsione el campo. El dispositivo de sondeo con la bobina se muestra en la siguiente figura: Fig. 11.

En la figura anterior se muestra el circuito que contiene a la bobina que nos sirve para determinar la curva característica de magnetización del material de las probetas.

Resumiendo, el método consiste en que por medio de un Gaussmetro se le mide a la probeta su magnetismo remanente, este instrumento de medida tiene en forma esquemática el siguiente diagrama de operación:

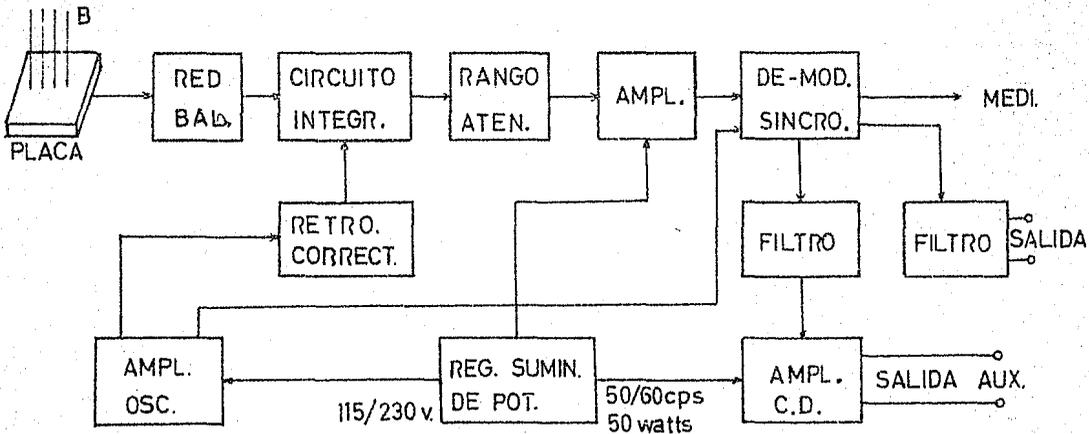


Fig. 12

ESQUEMA DE OPERACION DE UN GAUSSMETRO.

En donde el elemento sensible es un cristal de forma de una delgada hoja de arseniuro de indio de muy alta pureza el cual presenta el efecto Hall, es decir que cuando se excita una corriente por el eje X <sup>aparecerá en el eje Y una dif. de pot. la cual</sup> es proporcional a la componente en el eje Z de la densidad de flujo magnético. La corriente excitada a 1 -

Kc suministra una alimentación de acción variable, resultando una producción de C.A. exactamente proporcional a la intensidad del campo magnético. Una red equilibradora simplificada de voltajes residuales exteriores nulos obtenidos de campos dispersos y del campo magnético de la tierra, con los efectos en la misma forma que un circuito resistivo y reactivo.

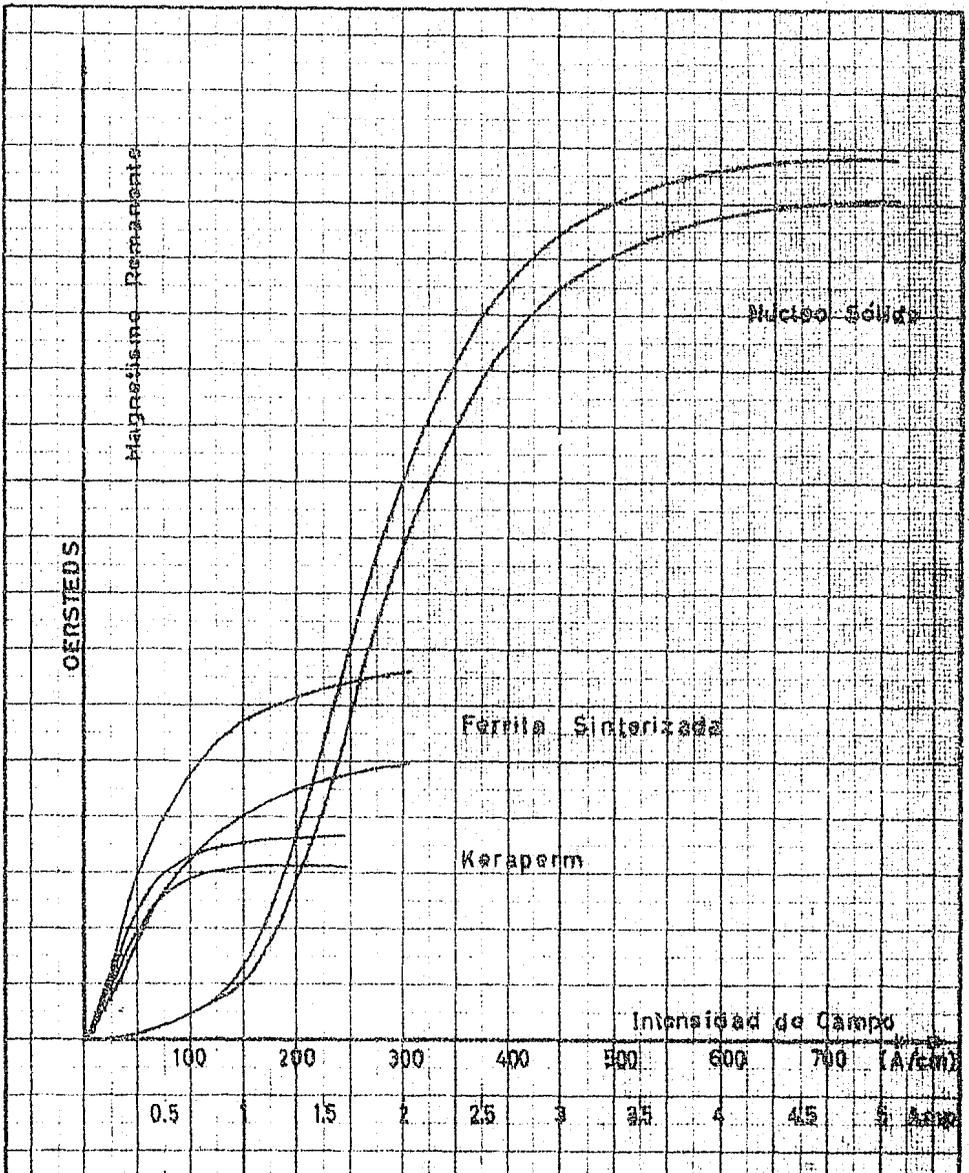
La señal después se amplifica por medio de un amplificador pasa-banda de gran estabilidad, la señal se demodula sincrónicamente para restaurar la magnitud y dirección originales de la densidad de flujo como si fuera una salida de C.D. La señal de flujo estable es filtrada e indicada en el medidor directamente en gauss.

Las componentes de campo C.D. y C.A. pueden observarse en un osciloscopio o graficarse en un voltmetro gráfico usando las terminales que se colocan en el frente del tablero del Gaussmetro.

En la forma descrita anteriormente es como trabaja el instrumento que nos mide el magnetismo remanente de la probeta.

Después de tener este dato, se obtiene una curva de magnetización del material de la probeta por medio del circuito de la figura (11) con la corriente alterna se desmagnetiza la probeta, después se empieza a magnetizar con corriente directa y se mide el magnetismo de la probeta, se anota en la gráfica de la Fig. (13), se desmagnetiza y se vuelve a magnetizar con una corriente directa de mayor intensidad, se repite el ciclo hasta obtener la curva completa mostrada en la Fig. (13).

Como conocemos las características de la bobina las cuales son: 4708 vueltas de alambre del #16AWG y además sus dimensiones; el campo que produce es:



U N A M	Tesis Profesional	P  I
	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES MATERIALES	
	FIG 3	
BERNARDO NOQUE Y		1967

$$H = \frac{4708}{30.0} \frac{I}{\sqrt{1 + \left(\frac{50}{30.0}\right)^2}}$$

$$H = 150 I \quad \text{Amp/cm} \quad (I-7)$$

Ahora con esto nos damos cuenta que podemos emplear cualquier instrumento que nos mida con cualquier unidad la intensidad de campo magnético ya sea en Gauss o en Oersteds, ya que como por ejemplo si una probeta nos indica supongamos 200 Oersteds, como ya dijimos obtenemos la curva completa y donde nos indique para 200 Oersteds vemos la correspondencia en amperes de C.D. del circuito de la Fig.(11), esta corriente de acuerdo con la ecuación (I-7) vemos que para producirle este valor de 200 Oersteds de magnetismo remanente a la probeta necesitamos aplicarle a la bobina magnetizadora X Amp. de directa, que de acuerdo con la fórmula (I) producimos con la bobina K Amp/cm., este valor es el que aproximadamente nos produjo el magnetismo remanente en la probeta.

Ya conocemos el campo magnético en Amp/cm que nos produjo el magnetismo remanente de 200 Oersteds de la probeta, ahora relacionemos esta intensidad de campo con el que produjo al principio la descarga atmosférica.

Vimos en párrafos anteriores que la intensidad de campo magnético producido por la corriente de una descarga atmosférica, la cual baja a tierra por un conductor cilíndrico recto está dada por la fórmula:

$$H = \frac{I}{2 \pi a} \quad \frac{\text{Amp}}{\text{cm}}$$

En donde H es la intensidad de campo la cual nos produjo en la probeta un magnetismo remanente de 200 Oersteds, la cual con la bobina empleada corresponde a K Amp/cm, como conoce-

mos la distancia  $a$  de la probeta al conductor rectilíneo de la ecuación anterior podemos determinar directamente el valor de la corriente  $I$  de la descarga atmosférica, resolviéndose así el problema de determinar el valor de cresta de la corriente de la descarga atmosférica.

En el caso de que la corriente de descarga baje por una de las estructuras de las torres de transmisión, la última fórmula para determinar la corriente de descarga nos la da la siguiente ecuación empírica, la cual toma en cuenta otros factores como son la disposición de las patas con respecto a las que tiene la probeta, ya que se supone que por las 4 patas pasa cierta corriente y cada una de estas corrientes tiene influencia en el magnetismo remanente de la probeta.

Supongamos que la disposición de la probeta en la estructura es la siguiente:

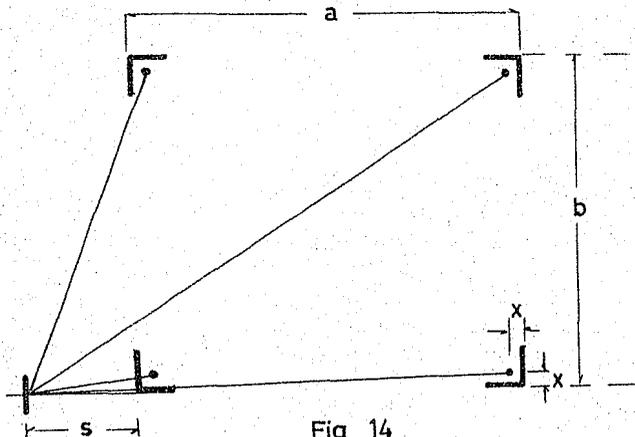


Fig 14

Para este caso en que la probeta está colocada en un ángulo de las patas de la estructura, si se magnetiza dicha probeta, para su estudio se realizan todos los pasos indicados anteriormente como son: Se mide su magnetismo remanente con el Gaussmetro y con el circuito para magnetizar y desmagnetizar se obtiene la curva característica de magnetización del material de la probeta, con la primera lectura del Gaussmetro se obtiene la corriente continua que con la bobina de trabajo se produce el mismo magnetismo remanente en la probeta, y en la misma forma también indicada se obtiene la intensidad de campo que produce el magnetismo remanente anteriormente medido.

Este valor se substituye en la siguiente fórmula y se despeja la corriente, obteniéndose así el valor de la corriente de la descarga:

$$H = \frac{8 \pi n}{L \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^2 \right]} \left[ \frac{S+X}{(S+X)^2 + X^2} + \frac{S+X}{(S+X)^2 + (b-X)^2} + \frac{S+a-X}{(S+a-X)^2 + (b-X)^2} + \frac{S+a-X}{(S+a-X)^2 + X^2} \right]$$

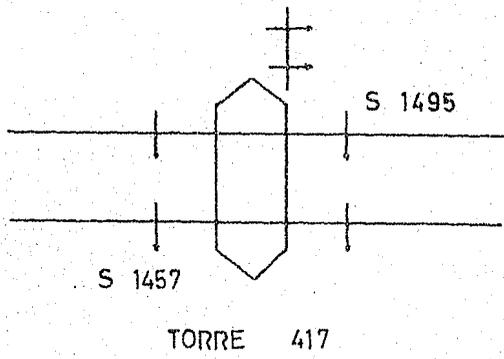
Como se ve es una fórmula muy complicada, se usa poco porque son pocas las probetas colocadas en los ángulos de las estructuras.

En la Fig. (15) tenemos un informe de unas probetas que se comprobó que se magnetizaron y se reportan al Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica para su análisis, esta es la forma en que se reportan. Este reporte como se podrá ver corresponde a unas de las probetas que se colocaron en la línea Infiernillo-Nopala.

En la Fig. (16) tenemos dos gráficas de magnetización de dos probetas y la determinación de la corriente de la descarga

LT 400 KV INFIERNILLO NOPALA

CIRCUITO 1

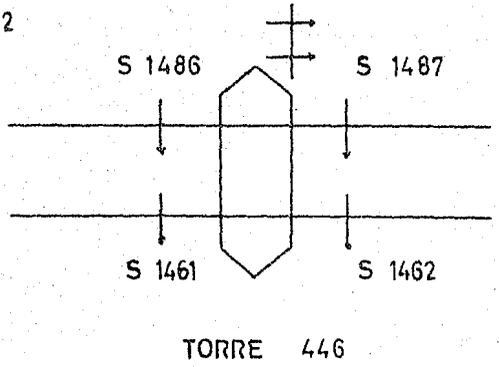


NOPALA

RESISTENCIA A TIERRA  $R = 3$  ohms

FECHA DE LA TORMENTA 19 de julio 1967

CIRCUITO 2



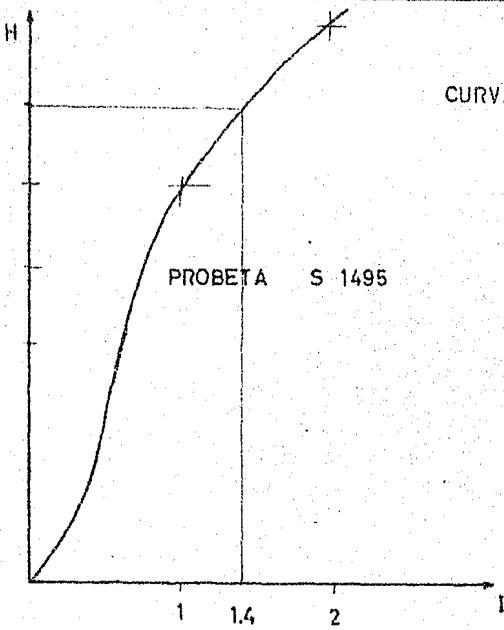
NOPALA

RESISTENCIA A TIERRA  $R = 65$  ohms

FECHA DE LA TORRMENTA 19 de julio 1967

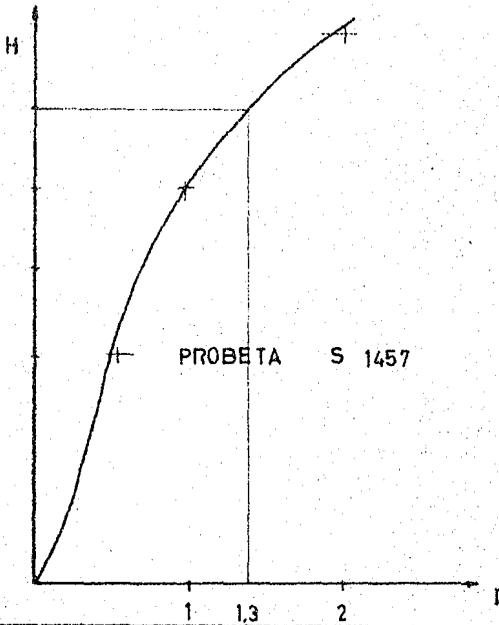
U N A M	Tesis Profesional	F I
	REPORTE DE PROBETAS MAGNETIZADAS	
Fig 15	GERARDO ROQUE V	1967

CURVAS CARACTERISTICAS



$$\begin{aligned}
 H &= 150 I \text{ amp/cm} \\
 &= 150 \times 1.4 \\
 &= 210 \text{ amp/cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= 2 \pi r H \text{ amp} \\
 &= 6.28 \times 10 \times 210 \\
 &= 13180 \text{ amp}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 H &= 150 \times 138 \\
 &= 206 \text{ amp/cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= 6.28 \times 10 \times 206 \\
 &= 13000 \text{ amp}
 \end{aligned}$$

Figura 16

ra atmosférica, ya que dichas probetas estaban colocadas en una terminal a tierra cilíndrica y recta.

En esta forma se obtienen los valores de las descargas atmosféricas para llevar así un análisis estadístico de ellas, para tener bases firmes para futuras instalaciones a las cuales se les pueda determinar un índice de confiabilidad de su operación.

Ya que con todos los datos que se lleven de:

Corrientes de descargas.

Frecuencia anual de tormentas en la región.

Resistencia del terreno.

Nivel básico al impulso del aislamiento.

Nos sirven para determinar como ya se indicó la confiabilidad de nuestra instalación y poder resolver los problemas que se presenten debido a las descargas atmosféricas y poder asegurar así la continuidad del servicio.

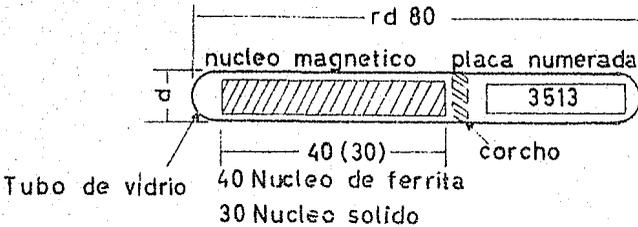
En los párrafos anteriores vimos que conociendo la distancia de la probeta al conductor por el que pasa la corriente impulsiva, puede determinarse ésta a partir del magnetismo remanente.

Es necesario también conocer la colocación apropiada de la probeta con relación al conductor, para que con la posición de los polos norte y sur que se forman en el material magnetizado, se pueda así determinar la dirección de la descarga, si esta fue de la nube a tierra o viceversa.

Las probetas tienen la siguiente forma, son unas pequeñas cápsulas cilíndricas, en uno de sus extremos tiene el material magnetizable y en el otro un número para su identificación:

Fig 17

## PROBETA MAGNETIZABLE

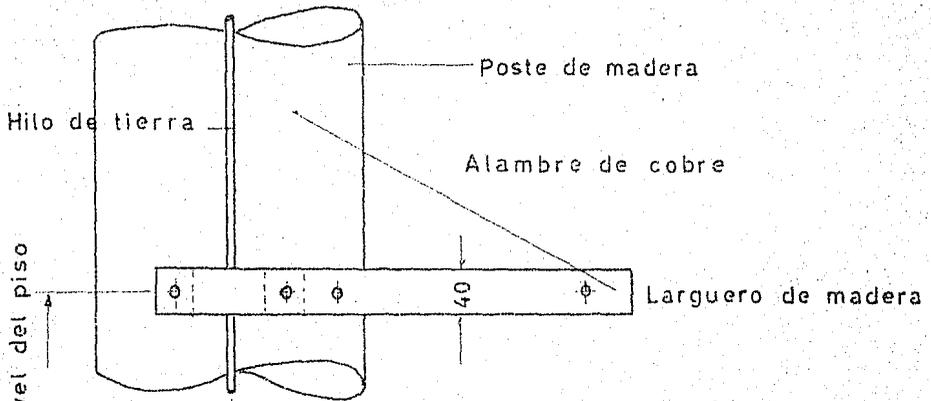


La colocación de las probetas en los postes de madera debe hacerse como se indica en la figura 18, también se muestra en la misma figura el larguero sobre el cual se montan las dos probetas magnetizables, el alambre de cobre además de que sirve de soporte evita que las aves se posen sobre el larguero y destruyan o aflojen las probetas.

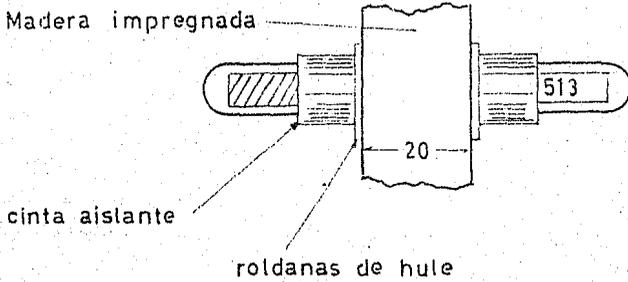
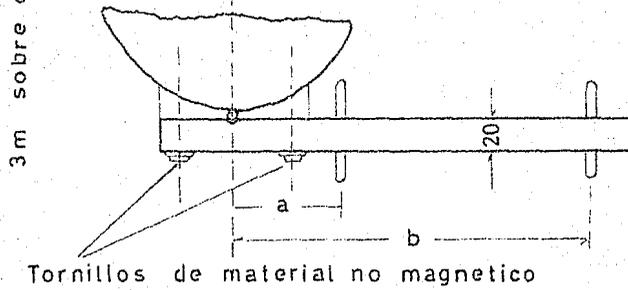
En la parte inferior de la figura 18 se muestra la forma como se sujetan las probetas al larguero, esto se hace para evitar que el viento las quite de su lugar, o que por vibración también se aflojen y se caigan destruyéndose así por ser de vidrio la cápsula que contiene el material magnetizable.

En el larguero tenemos colocadas dos probetas, esto es debido a que así se aumenta el rango de medición de la corriente de descarga, las dos probetas deberán tener el material magnético en un mismo sentido.

Los materiales de montaje no deben ser materiales ferromagnéticos para que de esta forma no se tengan errores, ya que la presencia de estos materiales nos distorsionan el campo magnético creado por la corriente de descarga, y la lectura que determinaríamos estaría afectada de un error muy grande, lo que inutilizaría este método.



COLOCACION DE PROBETAS EN POSTES DE MADERA



SUJECCION DE PROBETAS

Si es una terminal cilíndrica recta a tierra se deberá tener la siguiente disposición: Fig. 19

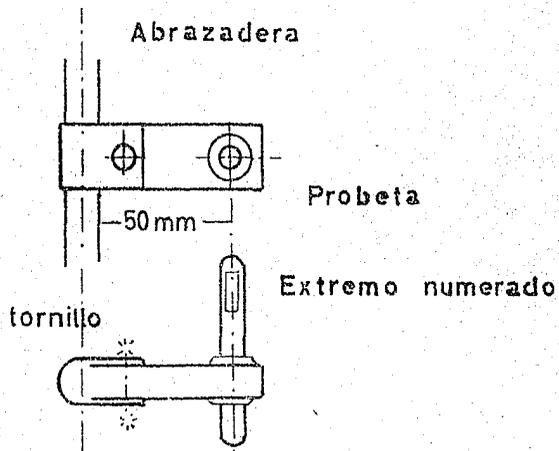


Fig 19 en conductores redondos

Si es un conductor de sección rectangular a tierra la colocación deberá ser como se indica en la Fig.20.

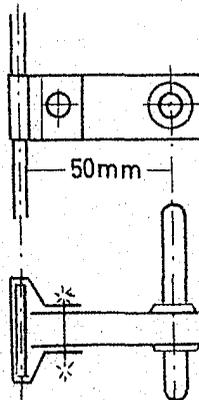


Fig 20 en conductores planos

La colocación de las probetas en las terminales de los apartarrayos deberá ser en un lugar accesible y que no presente peligro para el encargado de revisarlas, no deberán estar a una altura menor de 1 metro del piso. En los apartarrayos se colocarán en la forma como se indica en la Fig.21.

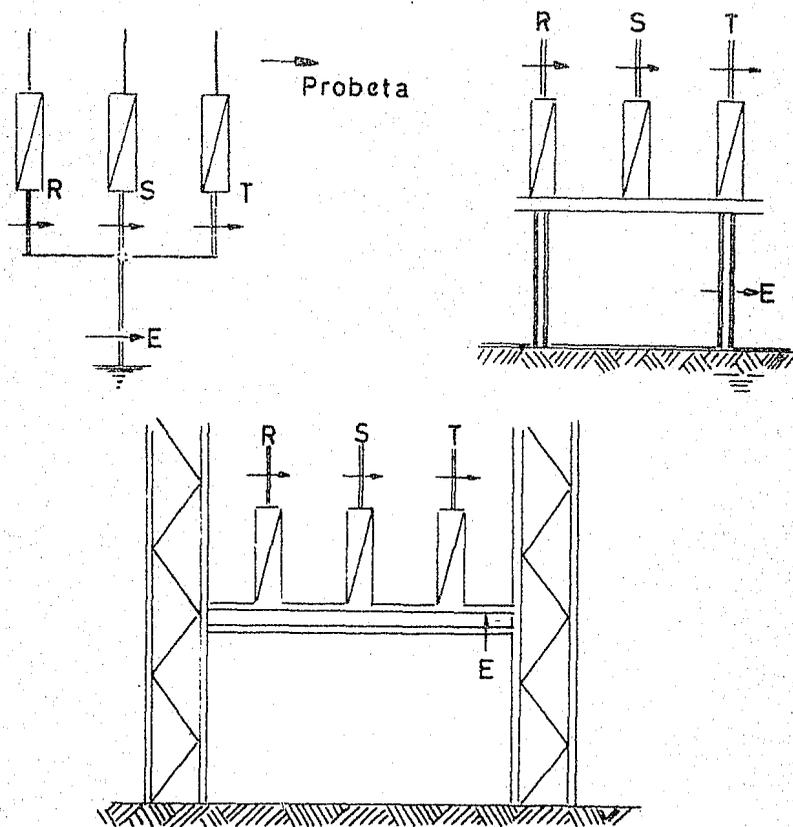


Fig 21 MONTAJE DE PROBETAS  
EN APARTARRAYOS

Como algunas veces no son accesibles las terminales de los apartarrayos, para ver si alguna de ellas está magnetizada se empleará una cuarta probeta de control en un sitio más accesible, como la que está con la letra E de la Fig. anterior.

En los conductores de las líneas de transmisión se pueden colocar probetas, pero esto está restringido al caso de que se pueda estar desenergizando la línea después de cada tormenta, pero en nuestro caso esto es antieconómico y no es procedente, lo cual no se hizo en el Sistema Occidental.

El montaje de las probetas en las torres se hará en la parte en donde se haya determinado que pasará por ahí la corriente de descarga.

Como se podrá notar en algunos largueros tenemos colocadas dos probetas en cada uno de ellos, esto se hace así como ya se explicó con el fin de tener un rango mayor de medición de las intensidades de corriente de las descargas atmosféricas. Además en algunos largueros se colocan unos tirantes con objeto de evitar que se posen sobre ellos aves y aflojen o destruyan las probetas.

Para investigar si alguna probeta se ha magnetizado por que se tiene que los contadores de los apartarrayos han operado se revisarán las probetas con ayuda de una brújula altamente sensible, colocándola en la siguiente forma:

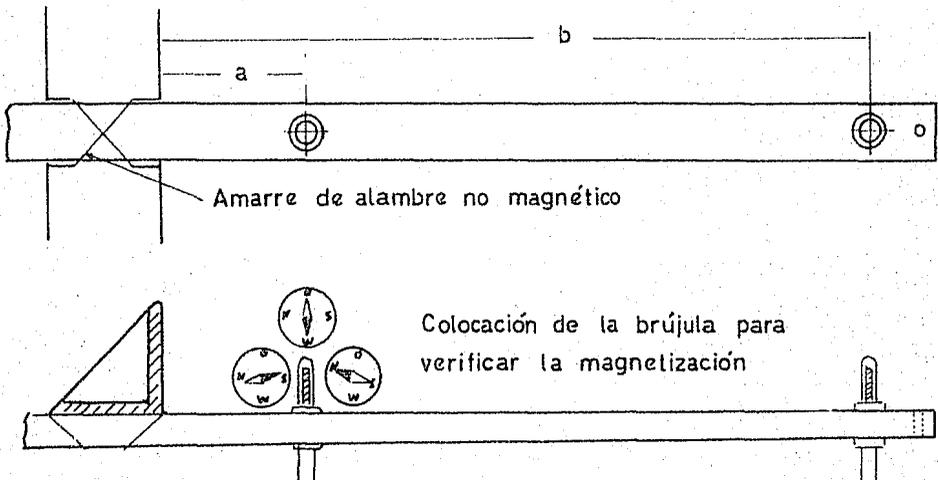


Fig 22 LARGUERO DE MADERA EN ANGULARES DE TORRES

Si la aguja de la brújula se desvía de su posición normal se deberá desmontar la probeta para analizar su magnetismo remanente en la forma ya mencionada.

Una consideración que se deberá tener cuando se empiezan a colocar las probetas en sus largueros, para asegurarse que no están magnetizadas, se puede comprobar con la brújula colocando la probeta en la dirección Este-Oeste si la probeta está desmagnetizada la aguja de la brújula no se deberá desviar, o cuando mucho una división de la escala de la brújula.

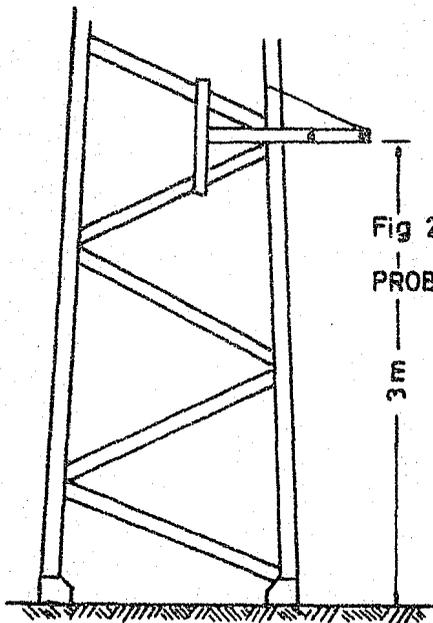


Fig 23 MONTAJE DE  
PROBETAS EN TORRES

## OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICION.

Ya hemos analizado el método que se está empezando a utilizar en México para la determinación de las características de las descargas atmosféricas, nos queda por lo tanto mencionar otros métodos e instrumentos que se han elaborado para el mismo fin.

Al principio el principal problema con que se tropezó fue el de que no se tenía la seguridad de poder indicar en qué determinado lugar caería una descarga, ya que como se ha dicho anteriormente no se puede predecir ya que es un fenómeno que ocurre al azar.

Además de lo anterior se presentó el problema de que cual debería ser la capacidad del equipo e instrumentos de medición, ya que no se puede decir también que la descarga es de una tensión y una corriente determinadas ya que pueden variar de unos cuantos amperes hasta más de los 100,000 amperes.

El primer punto que se atacó fue el de que los instrumentos se deberían de colocar en las zonas o lugares de mayor altura, ya que en éstas el gradiente de potencial producido por la presencia de una nube cargada es mayor que en uno de menor altura.

Junto con el problema de determinar en que punto caerá la descarga se presentó el problema económico ya que es necesario colocar varios instrumentos para tal fin y algunos de ellos son muy caros, y no es posible disponer de ellos en cantidad suficiente para cubrir una región en donde las tormentas con descargas son frecuentes.

Haciendo un poco de historia vemos que el primer instrumento que se empleó fue muy tosco en su construcción aparte -

de que es muy sencillo ya que consta únicamente de unos electrodos cuya separación es graduable y por medio de ésta se puede decir de qué magnitud es una descarga ya que al tocar ésta al aparato, conociendo la separación y el medio dieléctrico es sencillo determinar qué valor tenía la descarga que se hacía pasar por el instrumento para medirla.

Una combinación de varios electrodos se empleó para tratar de determinar la forma de la onda de la descarga atmosférica. Con este instrumento se obtuvo muy poca información al respecto.

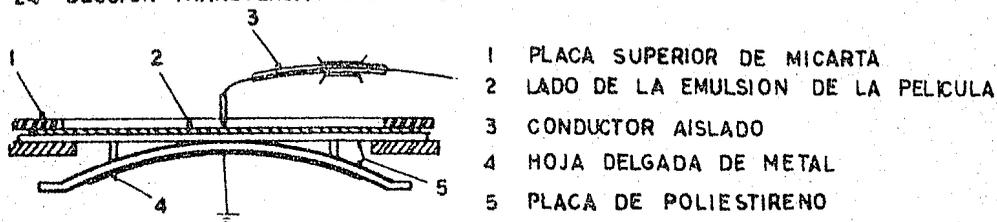
Como se mencionó, según la forma como se destruya el dieléctrico o la marca que haga sobre él la descarga es una medida de la intensidad del rayo.

Mencionaré otros tipos de instrumentos los cuales no se han empleado en México por su costo y porque no se ha realizado un estudio a conciencia de este tema.

Hay un dispositivo que se apoya en el fenómeno que ocurre cuando se aplica un gradiente de potencial a una placa fotográfica el cual consiste en que dicha placa registra unas figuras muy características cuyo tamaño y disposición son función de la intensidad del campo electrostático, de su polaridad y de su naturaleza.

Este dispositivo que registra gradientes de potencial se le denomina KLYDONOGRAFO cuya disposición general es la siguiente:

FIG 24 SECCION TRANSVERSAL DEL KLYDONOGRAPH



Como se muestra en la figura, consta principalmente de un electrodo de forma cilíndrica el cual descansa sobre el lado de la emulsión de una película fotográfica, ésta a su vez se coloca sobre una placa aislante debajo de la cual se encuentra el otro electrodo, pero de forma de un casquete esférico. Con esto la reducción de la intensidad del campo es más rápida ya que la velocidad de separación radial es mayor que si la placa inferior fuera plana.

Este dispositivo tiene algunas limitaciones ya que para voltajes mayores de 22 KV la película se quema y el menor voltaje que puede registrar es de 3 KV.

Como mencioné anteriormente que por medio de las figuras de la película se puede definir la naturaleza del campo, ya que si es oscilante nos produce figuras superpuestas, con lo cual la primera distinción que se puede hacer de las figuras es el tipo de campo eléctrico. Y si la figura es simétrica o asimétrica nos indica la dirección del campo.

La aplicación de este dispositivo para obtener información de las ondas de las descargas atmosféricas es muy poca ya que la exactitud del aparato es cuando mucho de un 50% y no se puede tener una información aceptable de dichas formas de ondas.

Y para tener una información completa de como varía el gradiente de potencial durante una tormenta se ha empleado una película a la cual se le da un movimiento sincronizado con un reloj para tener un control completo. Y con un movimiento rápido se pueden registrar ondas de descargas atmosféricas y voltajes de frecuencia del sistema.

El único dispositivo que proporciona directamente la forma de la onda de la corriente de una descarga atmosférica es un oscilógrafo de rayos catódicos. El principio bajo el cual fun

ción es ampliamente conocido, únicamente que se le adapta una cámara fotográfica con lentes ultrarápidos para registrar la forma de la onda, primero se ensayó con descargas atmosféricas artificiales. Y hasta la fecha nomás se ha podido colocar en edificios o lugares muy altos como el Empire State en donde se han registrado hasta 50 descargas en su torre, y de acuerdo con estos récords se tiene la forma de onda de la descarga atmosférica, la cual tiene una forma idéntica al tipo de onda de los sobrevoltajes que se producen en las líneas de transmisión.

También se ha podido determinar así la velocidad con que la onda adquiere su valor máximo o de cresta.

Para que el oscilógrafo opere en el momento en que ocurre el fenómeno se le ha arregrado un dispositivo el cual lo pone a funcionar en el momento indicado, este dispositivo no es otra cosa más que un relé, lo cual permite un funcionamiento adecuado del registrador.

El oscilógrafo consiste únicamente de un tubo al cual se le ha hecho el vacío, en uno de sus extremos tiene un cátodo el cual emite un chorro de electrones y son acelerados hacia un ánodo, cuyo potencial es de varios cientos de volts arriba del potencial del cátodo. El ánodo sirve como discriminador de los electrones y solo permite el paso de los que hayan alcanzado una velocidad determinada pasan entre unas placas horizontales y verticales, a las cuales se les puede conectar directamente a la terminal del mástil en donde cae la descarga atmosférica y de esta forma se desvía el chorro de electrones los cuales inciden sobre una placa fotográfica con lo cual se obtiene la información requerida de la forma de onda de las descargas y el tiempo que necesitan las ondas para alcanzar su valor de cresta. En paralelo con las placas deflectoras se coloca una resistencia shunt, para que de esta forma se proteja al equipo y se le de un camino a tierra a la corriente de la descarga.

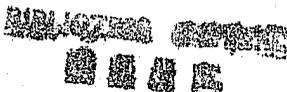
Un dispositivo muy semejante al que describí al principio es el de emplear delgadas hojas de papel entre los electrodos que conducen la corriente de la descarga, y por medio de la perforación del papel se puede estimar el valor de la corriente de descarga ya que por medio de un generador de ondas se ha podido llegar a la conclusión de que la perforación del papel es proporcional a la corriente que le produce la perforación.

El método original en el cual se basa, el que se empieza a aplicar aquí en México, es el que se denominó Ampérmetro Magnético con el cual se determina únicamente el valor de cresta de una onda. Consta de un recipiente de material no magnético el cual contiene un haz de conductores de acero los cuales tienen un magnetismo remanente muy elevado.

Su funcionamiento es idéntico al de las probetas magnetizables antes mencionadas. Y el valor de su magnetismo remanente se determina por medio de un dispositivo análogo al mencionado para las probetas magnetizables.

Este método es barato y de operación muy simple, obtenemos con él el valor de la corriente de la descarga y su polaridad. Ya que el magnetismo remanente en los conductores de acero está en función de la corriente que los magnetiza, tomando en cuenta que las ondas deben tener una dirección, esto es que no oscilen porque alterarían la localización de los polos y no se podría determinar el sentido de la descarga.

La instalación de los dispositivos magnetizables es completamente idéntica a la de las probetas magnetizables, el empleo de dos eslabones en una misma ménsula nos da un rango bastante amplio de magnitudes de corriente y se colocan de manera que los atraviesen completamente las líneas de fuerza magnética y para facilitar la formación de los polos en sus extremos.



Como hemos indicado el método anterior únicamente nos registra el valor de cresta, pero de primordial importancia son los valores de forma de onda y el tiempo en que alcanza su valor máximo. Lo anterior nos lo podría dar un oscilógrafo de rayos catódicos, pero su costo nos limitaría a usar otro dispositivo. Para eso se desarrolló un instrumento el cual toma como base la magnetización de unas pequeñas láminas de acero en la misma forma como el ampérmetro magnético de cresta de onda o la de las probetas magnetizables.

Dichas láminas van colocadas en la periferia de una rueda de un material no magnetizable, la cual puede hacerse girar a una velocidad determinada. Las láminas pasan por el campo magnético que produce la corriente de descarga, las láminas se magnetizan y midiendo su retentividad se puede hacer una gráfica de este valor contra el tiempo. La determinación del magnetismo remanente se hace en la misma forma como se indicó para las probetas o sea que funciona en la misma forma, únicamente que en el dispositivo en cuestión introduce la función tiempo. Lo cual nos permite obtener la forma de las ondas y los valores del tiempo en que éstas alcanzan su valor máximo y además la duración casi-completa de las ondas.

El dispositivo que estoy mencionando se le ha denominado con la palabra FULCHRONOGRAFO, el cual en realidad no es otra cosa mas que una modificación del ampérmetro magnético de crestas de ondas ya que su base fundamental es la de este último.

### CAPITULO III.

#### SOBREVOLTAJES Y SU PROPAGACION EN LAS LINEAS DE TRANSMISION.

Al principio del capítulo anterior mencioné los diferentes tipos de sobrevoltajes que se pueden presentar en un sistema eléctrico, los cuales enumeraré brevemente.

a).--Primero analizaré los sobrevoltajes de frecuencia normal debidos a cortos-circuitos.

De las diferentes formas que se puede presentar un corto-circuito, el que produce sobretensiones más elevadas es el monofásico a tierra. El cual analizaré rápidamente con las componentes simétricas, y suponiendo un sistema radial compuesto de un generador, un transformador y una línea en la cual ocurre la falla y cuyo diagrama unifilar es el siguiente:

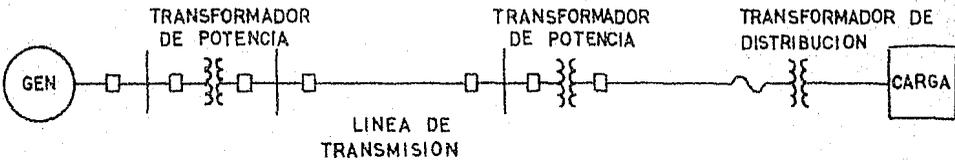


Fig. 25 DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA RADIAL

Los diagramas de secuencia positiva, negativa y cero son los siguientes:

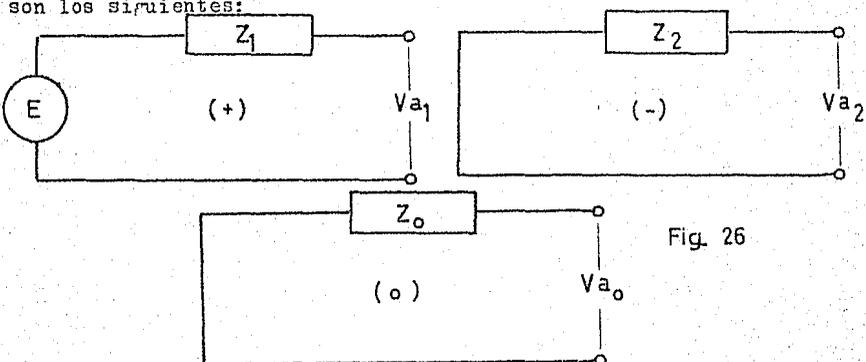


Fig. 26

Por lo que tenemos:

$$V_{a_1} = E - Z_1 I_{a_1}$$

$$V_{a_2} = -Z_2 I_{a_2}$$

$$V_{a_0} = -Z_0 I_{a_0}$$

Pero sabemos que  $Z_1 = Z_2$  además  $I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0}$ , y el arco tiene un valor de resistencia igual a  $R_f$ , podemos representar el siguiente diagrama:

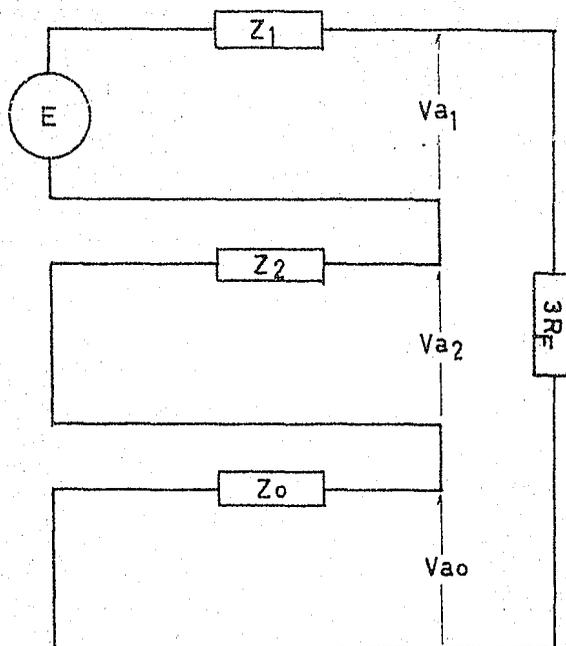


Fig 27

De donde:

$$I_{a_1} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} = \frac{E}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f}$$

El valor de la tensión en la fase A es igual a la suma de las componentes simétricas de esta fase:

$$V_a = V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0}$$

Sustituyendo

$$V_a = E \left( 1 - \frac{2Z_1 + Z_0}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f} \right)$$

Simplificando:

$$V_a = E \frac{3R_f}{2Z_1 + Z_o + 3R_f}$$

Si la resistencia del arco fuera igual a cero, lo cual equivale a un corto-circuito perfecto sin arqueo en la fase en - que ocurre la falla el voltaje  $V_a$  será cero.

Y en las otras dos fases tendremos:

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_{b0} = V_{a0}$$

$$V_b = a^2 (E - Z_1 I_{a1}) + a (-Z_2 I_{a2}) + (-Z_o I_{a0})$$

En la ecuación anterior sustituimos los valores de -

$I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  y  $I_{a0}$

$$V_b = a^2 \left[ E - Z_1 \frac{E}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right] + a \left[ -Z_2 \frac{E}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right] + \left[ -Z_o \frac{E}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right]$$

$$\frac{V_b}{E} = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left[ \frac{Z_1 + Z_o + 3R_f}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right] + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left[ -\frac{Z_1}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right] - \frac{Z_o}{2Z_1 + Z_o + 3R_f}$$

$$= -\frac{1}{2} \cdot \frac{3Z_o + 3R_f}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2Z_1 + Z_o + 3R_f}{2Z_1 + Z_o + 3R_f}$$

$$= -\frac{1}{2} \left( \frac{2Z_1 + Z_o + 3R_f}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} - \frac{2Z_1 - 2Z_o}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$= -\frac{1}{2} - \frac{Z_o - Z_1}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \dots \dots \dots I$$

En forma análoga obtenemos el valor  $\frac{V_c}{E}$  :

$$V_c = -j \frac{Z_o - Z_1}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad Z_o = R_o + jX_o$$

$$\frac{V_c}{E} = -j \frac{R_o + jX_o - (R_1 + jX_1)}{2(R_1 + jX_1) + (R_o + jX_o) + 3R_f} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\frac{V_c}{E} = -j \frac{\frac{R_o}{X_1} + j \frac{X_o}{X_1} - \frac{R_1}{X_1} - j1}{2 \frac{R_1}{X_1} + j2 + \frac{R_o}{R_1} + j \frac{X_o}{X_1} + 3 \frac{R_f}{X_1}} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Si despreciamos las resistencias la ecuación anterior quedará:

$$\frac{V_c}{E} = -j \frac{\frac{X_o}{X_1} - 1}{\frac{X_o}{X_1} + 2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Para diferentes valores de  $\frac{X_o}{X_1}$  podemos obtener la siguiente gráfica de  $\frac{X_o}{X_1}$  contra  $\frac{V_c}{E}$

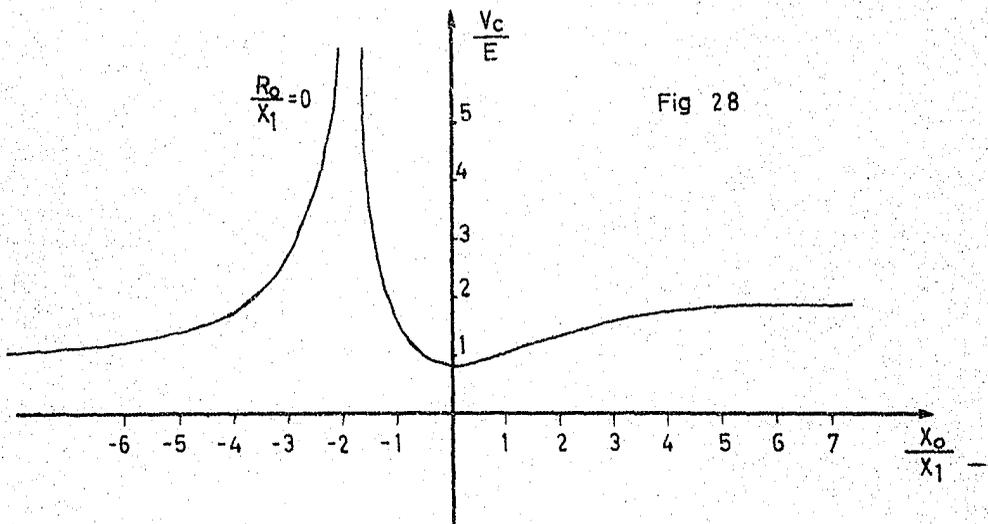


Fig 28

En la gráfica vemos que para valores cercanos a  $\frac{X_0}{X_1} = -2$

se tienen sobrevoltajes muy elevados, este corresponde al caso de que el sistema esté aislado, como podemos ver en el siguiente desarrollo. Primero suponemos que el sistema esté conectado a tierra:

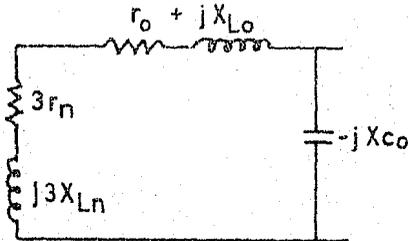


Fig. 29

$$Z_o = R_o + jX_o = \frac{-jX_{Co}(3r_n + j3X_{Ln} + r_o + jX_{Lo})}{r_o + jX_{Lo} + 3r_n + j3X_{Ln} - jX_{Co}}$$

$$Z_o = \frac{-jX_{Co}(3Z_n + Z_o^*)}{Z_o^* + 3Z_n - jX_{Co}}$$

Si  $Z_n \rightarrow \infty$  Es el caso de tener el neutro aislado.

$Z_o = -jX_{Co}$  por lo tanto

$$\frac{X_o}{X_1} = -\frac{X_{Co}}{X_1} < 0$$

La relación anterior es negativa y si su valor se acerca a  $-2$  el sobrevoltaje que se presenta en las fases b y c es varias veces el valor nominal de operación, de ahí la necesidad de aterrizar los sistemas. En la gráfica de la Fig.28 suponemos que

$$\frac{R_o}{X_1} = 0$$

Según las relaciones de  $\frac{X_o}{X_1}$  y  $\frac{R_o}{X_1}$  tendremos los siguientes

casos de conexiones del neutro.

Tipo de conexión a tierra.	Estado del Neutro.	$\frac{X_0}{X_1}$	$\frac{R_0}{X_1}$
A	Conectado	$0 < \frac{X_0}{X_1} < 3$	$0 < \frac{R_0}{X_1} < 1$
B	"	$0 < \frac{X_0}{X_1} \ll 3$	$0 < \frac{R_0}{X_1} \ll 1$
C	"	$\frac{X_0}{X_1} > 3$	$\frac{R_0}{X_1} > 1$
D	Aislado	$-\infty < \frac{X_0}{X_1} < -40$	—
E	"	$-40 < \frac{X_0}{X_1} < 0$	—

De lo anterior vemos la necesidad de conectar los sistemas a tierra para reducir de esta manera los sobrevoltajes debidos a fallas a tierra.

La conexión de los neutros se podrá hacer como se indica:

- 1.-Directamente a tierra.
- 2.-A través de un reactor.
- 3.-" " " una alta resistencia.
- 4.-" " " " baja resistencia.
- 5.-A " " un transformador.
- 6.-Sin conexión (aislado).

Lo que se requiere es determinar cual es el mejor tomando en cuenta los siguientes factores.

- I).-Que las fallas a tierra no sean de una intensidad tal que dañen al equipo.
- II).-Que los equipos eléctricos soporten los esfuerzos producidos por dichas corrientes.
- III).-Que la protección pueda tener selectividad.

Tomando en cuenta estos factores se puede elegir cual es la mejor forma de conectar el neutro del sistema.

Todo lo indicado en los párrafos anteriores es un resumen breve referente a los sobrevoltajes que se pueden presentar en los sistemas eléctricos debidos a cortos-circuitos, principalmente fallas a tierra.

b).-Sobrevoltajes debidos a fenómenos de resonancia.

En un circuito serie compuesto de resistencia, inductancia y capacitancia el valor de la corriente para un voltaje alterno de magnitud E será de:

$$I_r = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

Para el caso particular en que la reactancia inductiva tenga la misma magnitud que la capacitiva el valor de la corriente será máxima, y la caída de tensión en la inductancia tendrá el mismo valor que la de la capacitancia, pero de signo contrario, entonces estas caídas de tensión se equilibran, por lo que el valor de la corriente es únicamente el cociente del voltaje aplicado entre la resistencia.

En electricidad cuando se cumplen las condiciones anteriores, se dice que el circuito está en resonancia.

Si en el circuito anterior se varían los parámetros se puede llegar a la condición antes mencionada si se cambia la frecuencia del sistema de tal manera que la reactancia capacitiva sea igual a la inductiva; entonces a ese valor de la frecuencia se le denomina frecuencia de resonancia del circuito.

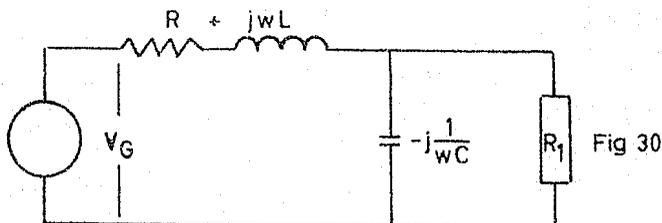
Aparte de que la corriente es máxima se presenta el hecho de que el voltaje en las terminales de la capacitancia y de la inductancia es mayor que la que se aplica al circuito. Esto mismo puede suceder en un Sistema Eléctrico de Potencia, siem

bre y cuando la reactancia capacitiva e inductiva de la línea de transmisión tengan el mismo valor, con lo cual se cumple la condición de resonancia, de allí el nombre de este tipo de elevación del voltaje.

Este fenómeno lo veremos mejor con el siguiente desarrollo:

Supongamos que tenemos un sistema eléctrico radial el cual consta de un generador, un transformador elevador, una línea de transmisión y una carga conectada a ella, como se indica en la Fig.25.

El cual podemos representar por el siguiente circuito equivalente:



Los parámetros indicados en el circuito anterior son los equivalentes de todos los elementos conectados en serie, y la impedancia vista del generador tendrá por valor:

$$\begin{aligned}
 Z &= R + j\omega L + \frac{-j\frac{1}{\omega C} \cdot R_1}{-j\frac{1}{\omega C} + R_1} \\
 &= R + j\omega L + \frac{R_1}{1 + j\omega CR_1}
 \end{aligned}$$

La corriente será por lo tanto igual a:

$$I = \frac{V_G}{R + j\omega L + \frac{R_1}{1 + j\omega CR_1}}$$

Y la tensión en las terminales de la carga será:

$$V = Z_{CR} I$$

$$Z_{CR} = \frac{-j \frac{1}{\omega C} R_1}{j \frac{1}{\omega C} + R_1} = \frac{R_1}{1 + j \omega C R_1}$$

$$V = \frac{R_1}{1 + j \omega C R_1} I$$

Sustituyendo el valor de I

$$V = \frac{R_1}{1 + j \omega C R_1} \frac{V_G}{R + j \omega L + \frac{R_1}{1 + j \omega C R_1}}$$

$$\begin{aligned} \frac{V}{V_G} &= \frac{1}{\frac{R}{R_1} + j \omega C R + j \frac{\omega L}{R_1} - \omega^2 LC + 1} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{R_1} - \omega^2 LC\right) + j \left(\omega C R + \frac{\omega L}{R_1}\right)} \end{aligned}$$

El módulo de la relación  $V/V_G$  será:

$$\frac{V}{V_G} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{R}{R_1} - \omega^2 LC\right)^2 + \left(\omega C R + \frac{\omega L}{R_1}\right)^2}}$$

Si consideramos que en un momento dado la carga vale 0 ó más bien que  $R_1 \rightarrow \infty$  la expresión anterior se nos simplifica bastante:

$$\frac{V}{V_G} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2}}$$

Si como se indica en un principio si la reactancia inductiva es igual a la capacitiva o sea que el circuito está en resonancia:

$$j\omega L - j \frac{1}{\omega C} = 0$$

$$\omega^2 LC - 1 = 0$$

Y tambien:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

$$\frac{V}{V_G} = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C^2 R^2}} = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 R^2 \frac{1}{\omega^4 L^2}}}$$

$$\frac{V}{V_G} = \frac{\omega L}{R}$$

Esta última expresión nos indica qué tantas veces es mayor la tensión en las terminales de la carga cuando el circuito esté en resonancia.

Y de esta manera se puede determinar este tipo de sobrevoltajes que se pueden presentar en los Sistemas de Potencia debido al fenómeno descrito.

De los sobrevoltajes de origen interno de un sistema que nos falta por mencionar es el que se produce por cambios bruscos en el sistema o por operaciones de los interruptores.

c).-Sobrevoltajes debidos a la operación de interruptores.

Ya que la operación de un interruptor produce un cambio en las condiciones del circuito, al producirse éste en las terminales del interruptor aparecen sobrevoltajes transitorios de muy alta frecuencia, cuyas ondas se propagan en la línea de transmisión, pudiendo dañar éstas al equipo primario conectado a la línea.

Este tipo de sobrevoltajes se analizan por medio de cir

cuitos monofásicos equivalentes, los cuales representan las condiciones instantáneas en las cuales ocurre la interrupción y se origina el sobrevoltaje.

Para esto como ya indiqué es necesario tener el circuito equivalente de todos los elementos que se encuentran unidos a la línea en la cual ocurre el disturbio.

Después de lo anterior el paso a seguir es establecer las ecuaciones integro-diferenciales que nos representan matemáticamente al circuito equivalente. Ya teniendo ésta se pueden resolver dichas ecuaciones por el método directo el cual consiste de los siguientes pasos:

1.-Derivar sucesivamente la ecuación hasta que desaparezcan las integrales.

2.-Obtener la función complementaria.

3.-Obtener la solución particular.

4.-Sumando 2 y 3 y aplicando las condiciones iniciales se obtienen las constantes.

Todos los pasos anteriores se pueden eliminar si se usa la Transformada de Laplace, la cual consiste en que las ecuaciones integro-diferenciales las transformemos en ecuaciones algebraicas, despejar de estas ecuaciones anteriores la ó las transformadas de las incógnitas, después de esto se halla la transformada inversa de la expresión que se haya obtenido.

Para lo anterior el primer problema que se presenta es la representación de los elementos del circuito.

Ya teniendo el circuito equivalente se establecen las ecuaciones integro-diferenciales las cuales constituyen el mode-

lo matemático del circuito, después de esto se saca la transformada de Laplace de cada una de las ecuaciones, la cual se puede obtener por medio de la siguiente fórmula:

$$\mathcal{L} [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

En donde  $\mathcal{L}$  es el símbolo de la transformada,  $f(t)$  es la función por transformar,  $e$  es la base de los logaritmos naturales,  $s$  es una variable compleja,  $t$  es la variable tiempo.

Se puede aplicar la fórmula anterior, o por medio de tablas las cuales tienen la transformada de las funciones más comunes, ya teniendo la transformada de cada una de las ecuaciones, se despeja cada una de las transformadas de las incógnitas, después de lo cual también con tablas con transformadas inversas de funciones comunes se puede terminar el problema.

Si no se dispone de las tablas, se puede aplicar la fórmula de la transformada inversa, o mejor se aplica el Teorema de Expansión el cual nos da la transformada inversa en una forma sencilla y rápida, el teorema se representa con la sig. ecuación:

$$\mathcal{L}^{-1} \left| \frac{Y(S)}{Z(S)} \right| = \sum_{k=1}^n \frac{Y(S_k)}{\left. \frac{dZ(S)}{dS} \right|_{S=S_k}} e^{S_k t}$$

$S_1, S_2, S_3 \dots S_k$  son las raíces de  $Z(S) = 0$

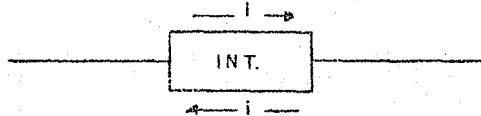
En donde  $\mathcal{L}^{-1}$  es el símbolo que representa la transformada inversa,  $Y(S)/Z(S)$  es la función por transformar.

$S_k$  es cada una de las raíces de  $Z(S) = 0$ .

Después de tener la serie de términos, se puede simpli

ficar la expresión de tal manera que nos quede en términos de funciones conocidas y comunes.

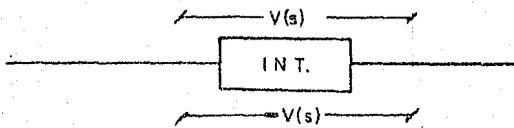
Ahora, como mencionamos al principio de este tema, los sobrevoltajes transitorios aparecen por la operación de los interruptores, por lo cual en el circuito equivalente debemos introducir el estado o situación que se presenta al ocurrir una apertura o cierre de un interruptor para lo cual se puede hacer de la siguiente manera:



En este caso la suma de las corrientes es cero y representa la interrupción del circuito, y el voltaje que aparece en las terminales del interruptor usando la transformada de Laplace será:

$$V(S) = [ -I(S) ] Z(S)$$

Y la representación del cierre del interruptor será:



La condición de interruptor cerrado es:

$$V(S) - V(S) = 0$$

En este caso la corriente sería:

$$I(S) = \frac{-V(S)}{Z(S)}$$

Para comprender mejor este método suponamos que tenemos un generador y una línea conectados y en el extremo una carga, y en un instante opera el interruptor que conecta la carga a la línea. El circuito equivalente es:

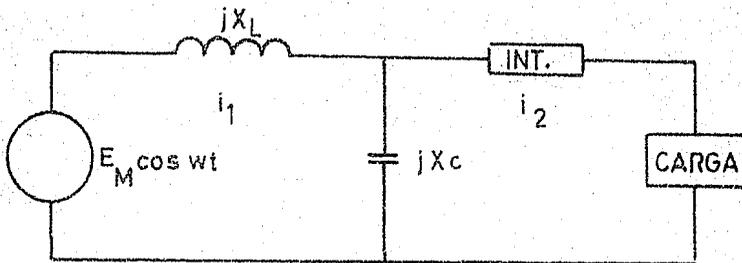


Fig. 31

Si en el diagrama anterior introducimos la condición de interruptor abierto y representando en dicho diagrama los elementos ya en forma transformada tendremos:

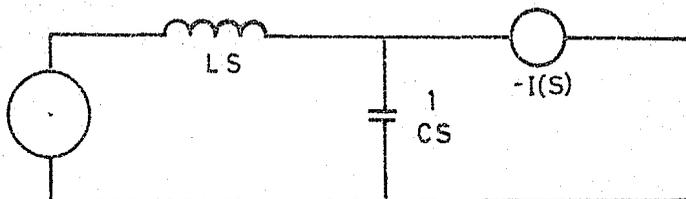


Fig 32

$$- I(S) = - \frac{E}{\omega L} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

$$V(S) = Z(S) [ - I(S) ]$$

$$Z(S) = \frac{LS \frac{1}{CS}}{LS + \frac{1}{CS}} = \frac{\frac{S}{C}}{s^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$V(S) = - \frac{E}{\omega LC} \left( \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \left( \frac{S}{s^2 + \frac{1}{LC}} \right)$$

$$V(S) = - \frac{E}{LC} \frac{S}{(s^2 + \omega^2) \left( s^2 + \frac{1}{LC} \right)}$$

Es la transformada del voltaje que aparece en las terminales del interruptor.

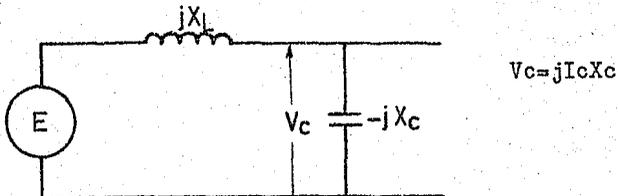
Podemos encontrar la transformada inversa por medio — del teorema de Expansión, pero es más rápido y sencillo con ayuda de tablas que contienen ya la transformada como es el caso de:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{S}{(S^2 + \omega^2)(S^2 + a^2)} \right] = \frac{1}{a^2 - \omega^2} (\cos \omega t - \cos at)$$

Aplicando esta expresión tendremos:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{-1} [V(S)] &= - \frac{E}{LC} \left[ \frac{1}{LC - \omega^2} (\cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t) \right] \\ v(t) &= - \frac{E}{1 - \omega^2 LC} (\cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t) \\ &= - \frac{E}{1 + \frac{j\omega L}{-j \frac{1}{\omega C}}} (\cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t) \\ &= - \frac{E}{1 + \frac{jXL}{-jXC}} (\cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t) \\ &= - \frac{E (-jXc)}{-jXc + jXL} (\cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t) \\ \frac{E (-jXc)}{-jXc + jXL} &= I_c (-jXc) \quad (P) \end{aligned}$$

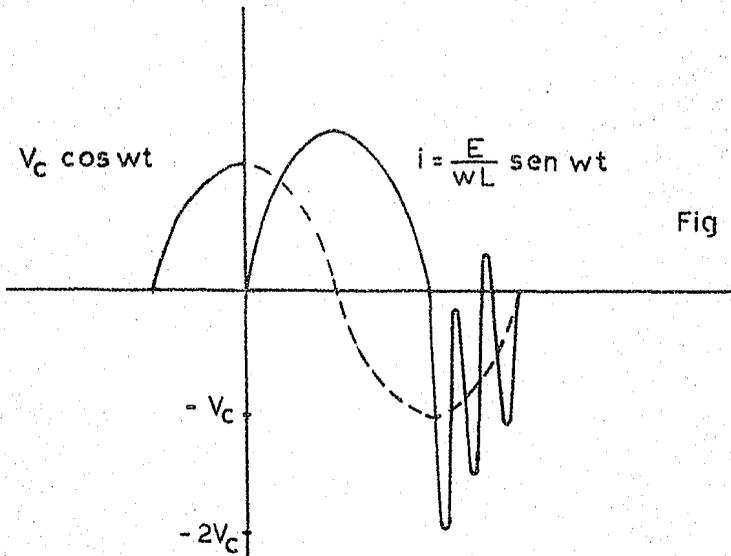
(P) es el voltaje que aparece en las terminales del condensador



$$v(t) = -V_c \left( \cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t \right)$$

Esta última expresión es el voltaje que aparece en las terminales del interruptor, se le conoce como voltaje de recuperación.

Podemos representar gráficamente dicho voltaje de recuperación para analizar a fondo la última expresión que obtuvimos, para lo cual tenemos a continuación una gráfica:



Vemos que el voltaje en las terminales del interruptor puede llegar a ser el doble del de operación.

En esta forma se estudian los sobrevoltajes que se presentan en las terminales de los interruptores debido a su operación con carga.

Aquí termino con los sobrevoltajes de origen interno, que como ya vimos son de tres tipos en general. Ahora pasaré a analizar los sobrevoltajes de origen externo, o sea los producidos por las descargas atmosféricas.

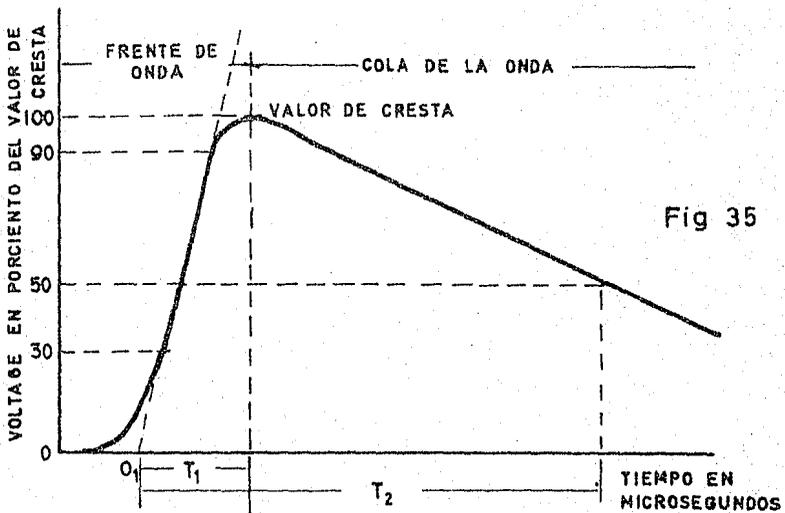
### SOBREVOLTAJES DE ORIGEN EXTERNO.

Como ya mencioné anteriormente este tipo de sobrevoltajes en las líneas de transmisión se deben principalmente a descargas atmosféricas, ya sea directamente a la línea o cerca de la línea de transmisión.

La descarga ya sea directa o no a la línea produce en esta una onda de sobrevoltaje la cual se propaga por la línea, pudiendo llegar al equipo primario y destruirlo.

Cuando la descarga no es directa en la línea sino que cae en su vecindad, por inducción electrostática se produce la onda de sobrevoltaje aunque de menor magnitud que si fuera una descarga directa.

Estas ondas de sobrevoltaje tienen con bastante aproximación la siguiente forma:



Esta forma se ha generalizado tanto para estudiar el fenómeno como para realizar pruebas de impulso.

Y se expresa con los dos valores de tiempo  $t_1$  y  $t_2$  en microsegundos, el  $t_1$  es el tiempo que tarda la onda en alcanzar la cresta, y  $t_2$  es el tiempo al cual la onda tiene un valor igual al valor medio de la cresta.

También se han generalizado los tiempos 1.5 y 40 microsegundos, esto quiere decir que la onda alcanza su valor máximo a los 1.5 microsegundos y a los 40 microsegundos la onda tiene un valor igual a la mitad de la amplitud de la cresta.

Se ha visto que la fuente de las ondas que se propagan (ondas errantes) en las líneas de transmisión, es la descarga atmosférica ya que dichas ondas son las más peligrosas para la operación de los sistemas eléctricos de potencia. Ya que si una descarga cae directamente en un conductor de energía elevará su voltaje enormemente, y existe por lo tanto el peligro de que se perfore el aislamiento. Por lo que para proteger a los cables de energía contra las descargas directas se emplea lo que se conoce como cable de guarda, el cual es un conductor que va en la parte superior de las líneas y en cada torre se conecta a tierra.

En el caso de que una descarga caiga en una torre o en una terminal a tierra se presenta el peligro de que se perfore el aislamiento debido a la caída de voltaje producida por la gran corriente que proviene de la descarga, la cual pasa por la resistencia de tierra de la torre. Por lo cual se recomienda que dicha resistencia sea lo más pequeña posible, para lo cual algunas veces será necesario tratar la tierra haciéndole mejoras.

Lo que es más frecuente son las ondas inducidas en las líneas por las descargas no directas en ellas y por la inducción electrostática de la nube sobre los conductores, lo cual hace

que dichos conductores se comporten como una placa de un condensador adquiriendo una carga electrostática y si ocurre una descarga no directa a la línea toda la carga eléctrica en la línea se desplaza hacia ambos lados en forma de ondas, pero este tipo de ondas no produce interrupciones del servicio eléctrico, por lo que no son peligrosas.

El hilo o cable de guarda también protege contra estas ondas inducidas, además de la protección que suministra contra las descargas directas.

Cualquiera que sea el origen de la onda inducida o de carga directa, el estudio teórico de su comportamiento en la línea se hace por medio de las siguientes consideraciones:

Supongamos que las ondas tanto de voltaje como de corriente se rigen por las siguientes expresiones:

$$v(x, t)$$

$$i(x, t)$$

Las cuales vemos que son función del tiempo y de la distancia que recorran. Por lo tanto para analizar el comportamiento de la línea con tales funciones, lo haremos considerando primero una sección infinitesimal  $\Delta X$  de la línea de transmisión con sus parámetros distribuidos pero representada dicha sección por el esquema de la figura 36.

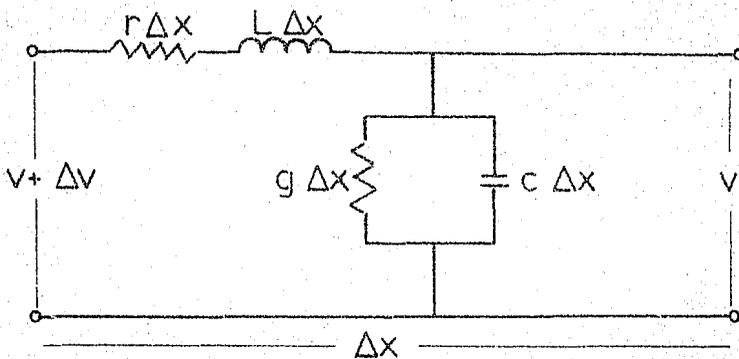


Fig 36

En donde:

$r$ ,  $L$ ,  $g$  y  $c$  son las constantes distribuidas por unidad de longitud.

Aplicando las dos leyes de Kirchohoff tendremos:

$$- \Delta v = r i \Delta x + L \frac{\partial i}{\partial t} \Delta x \quad (1)$$

$$- \Delta i = g v \Delta x + c \frac{\partial v}{\partial t} \Delta x \quad (2)$$

$$- \frac{\Delta v}{\Delta x} = r i + L \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$- \frac{\Delta i}{\Delta x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t}$$

Por lo tanto:

$$- \frac{\partial v}{\partial x} = r i + L \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$- \frac{\partial i}{\partial x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t}$$

Para resolver estas dos últimas expresiones por medio de la transformada de Laplace tendremos:

$$v(x, t) \quad \text{---} \quad V(x, S)$$

$$i(x, t) \quad \text{---} \quad I(x, S)$$

$$\frac{\partial i}{\partial t} = SI \qquad \frac{\partial v}{\partial t} = SV$$

De donde:

$$- \frac{\partial V}{\partial x} = (r + LS) I \qquad (3)$$

$$- \frac{\partial I}{\partial x} = (g + cS) V \qquad (4)$$

Obteniendo ahora la segunda derivada parcial de estas dos últimas expresiones y pasando el signo (-) al otro miembro de las ecuaciones quedarán en la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - (r + LS) \frac{\partial I}{\partial x} \qquad (5)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = - (g + cS) \frac{\partial V}{\partial x} \qquad (6)$$

Sustituyendo 4 y 3 en 5 y 6 respectivamente quedarán en la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (r + LS) (g + cS) V$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = (r + LS) (g + cS) I$$

$$(r + LS) \cdot (g + cS) = m^2$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = m^2 V \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = m^2 I \quad (8)$$

De las expresiones (7) y (8) vemos que la segunda derivada de la función es igual a la misma función multiplicada por una constante. En matemáticas sabemos que el tipo de funciones que tienen esta propiedad son las funciones exponenciales, por lo que podemos considerar que las funciones V e I son funciones exponenciales del siguiente tipo:

$$V = K e^{mx}$$

$$\frac{dV}{dx} = Km e^{mx}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = Km^2 e^{mx} = m^2 V$$

$$m = \pm \sqrt{(r + LS)(g + cS)}$$

De todo el desarrollo anterior podemos decir que las expresiones del voltaje y la corriente son las siguientes:

$$V = A e^{mx} + B e^{-mx} \quad (9)$$

$$I = C e^{mx} + D e^{-mx} \quad (10)$$

Nos queda por lo tanto determinar las constantes, para lo cual derivemos la ecuación (9)

$$\frac{\partial V}{\partial x} = mA e^{mx} - mB e^{-mx} = m(A e^{mx} - B e^{-mx})$$

Multiplicando esta última expresión por  $(-1)$  a ambos miembros de la ecuación:

$$- \frac{\partial V}{\partial x} = -m (A e^{mx} - B e^{-mx})$$

De las ecuaciones (3) y (10) podemos obtener la siguiente:

$$- \frac{\partial V}{\partial x} = (r + LS) I = (r + LS) (C e^{mx} + D e^{-mx})$$

Los coeficientes de  $e^{mx}$  y de  $e^{-mx}$  de las ecuaciones 11 y 12 deben ser iguales por lo tanto podemos decir que:

$$-m A = (r + LS) C$$

$$m B = (r + LS) D$$

$$C = \frac{-m}{r + LS} A$$

$$D = \frac{m}{r + LS} B$$

Sustituyendo el valor de  $m$  tenemos:

$$C = - \frac{\sqrt{(r+LS)(g+cS)}}{r + LS} A = - \sqrt{\frac{g+cS}{r+LS}} \cdot A$$

$$D = \frac{\sqrt{(r+LS)(g+cS)}}{r + LS} B = \sqrt{\frac{g+cS}{r + LS}} B$$

Al factor  $\sqrt{\frac{g+cS}{r+LS}}$  le llamaremos admitancia característica de la línea por lo que  $\sqrt{\frac{r+LS}{g+cS}}$

Es la impedancia característica de la línea, y las expresaremos como:

$Y_0$  y  $Z_0$  respectivamente.

$$\begin{aligned} C &= -Y_0 A \\ D &= Y_0 B \end{aligned} \quad (13)$$

Sustituyendo las expresiones (13) en 9 y 10, quedarán estas en la siguiente forma:

$$V = A e^{mx} + B e^{-mx} \quad (14)$$

$$I = -Y_0 (A e^{mx} - B e^{-mx}) \quad (15)$$

Nos quedan por determinar las constantes A y B, éstas por medio de las condiciones iniciales las cuales podemos representar con el siguiente diagrama:

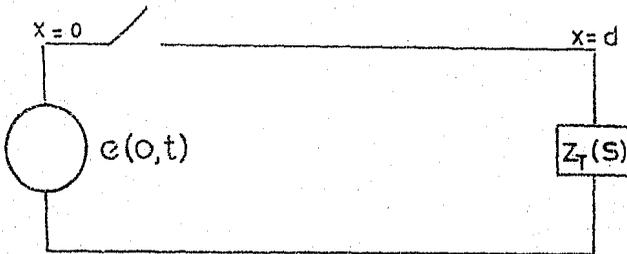


Fig 37

$$\int |e(0,t)| = E(0,s)$$

En el extremo izquierdo el voltaje aplicado es función únicamente del tiempo por lo que para el punto  $x=0$  la caída de tensión es:

$$V = E(0,s) = A e^{0} + B e^{0} = A + B.$$

$$B = -A + E(0,s)$$

Sustituyendo este último valor en (14) y (15) tendremos:

mos:

$$V = A (e^{mx} - e^{-mx}) + E(0,s) e^{-mx} \quad (16)$$

$$I = -Y_0 [A (e^{mx} + e^{-mx}) - E(0,s) e^{-mx}] \quad (17)$$

Nomás nos falta por determinar la constante A, consideremos las condiciones en las terminales de la carga  $Z_t(S)$

$$Z_t(S) = \frac{V(d,S)}{I(d,S)}$$

$$Z_t(S) = \frac{A (\epsilon^{md} - \epsilon^{-md}) + E(0,S) \epsilon^{-md}}{-Y_0 [A (\epsilon^{md} + \epsilon^{-md}) - E(0,S) \epsilon^{-md}]}$$

Despejando el valor de A:

$$-Y_0 Z_t(S) \cdot A \epsilon^{md} - Y_0 Z_t(S) A \epsilon^{-md} + Y_0 Z_t(S) \cdot E(0,S) \epsilon^{-md} = \rightarrow$$

$$= A (\epsilon^{md} - \epsilon^{-md}) + E(0,S) \epsilon^{-md}$$

$$A (\epsilon^{md} - \epsilon^{-md} + Y_0 Z_t(S) \epsilon^{md} + Y_0 Z_t(S) \epsilon^{-md}) = \rightarrow$$

$$= Y_0 Z_t(S) \cdot E(0,S) \epsilon^{-md} - E(0,S) \epsilon^{-md}$$

$$A = \frac{E(0,S) \epsilon^{-md} [Y_0 Z_t(S) - 1]}{\epsilon^{md} [Y_0 Z_t(S) + 1] + \epsilon^{-md} [Y_0 Z_t(S) - 1]}$$

Suponemos que:

$$R = \frac{Y_0 Z_t(S) - 1}{Y_0 Z_t(S) + 1}$$

$$A = \frac{E(0,S) \epsilon^{-md} \cdot R}{\epsilon^{md} + R \epsilon^{-md}}$$

Si  $d \rightarrow \infty$  tenemos el caso de la línea infinita pero según la expresión anterior la constante  $A \rightarrow 0$

Entonces las ecuaciones del voltaje y de la corriente en la línea infinita son:

$$V = E(0,S) \epsilon^{-mx}$$

$$I = Y_0 E(0,S) \epsilon^{-mx}$$

Las transformadas inversas serán:

$$\begin{aligned}
 v &= \int_0^{-1} \left[ E(0, S) e^{-\sqrt{(r+LS)(g+cS)} \cdot x} \right] \\
 i &= \int_0^{-1} \left[ Y_0 E(0, S) e^{-\sqrt{(r+LS)(g+cS)} \cdot x} \right] \quad (18)
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (18) por lo tanto son las funciones de la línea infinita ( $d \rightarrow \infty$ ). Podemos simplificar dichas expresiones si consideramos que la línea infinita es una línea sin distorsión o sea que la forma de onda aplicada en el origen de la línea se conserva hasta el extremo final de la línea.

Este caso se presenta en la línea cuyos parámetros cumplen la siguiente relación:

$$\frac{L}{r} = \frac{c}{g}$$

$$\frac{g}{r} = \frac{c}{L} = \frac{c}{L} \frac{s}{s} = \frac{g + cS}{r + LS} \quad (19)$$

La expresión que habíamos obtenido de  $Y_0$  era:

$$Y_0 = \sqrt{\frac{g + cS}{r + LS}}$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{c}{L}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{c}}$$

También tenemos que de la ecuación (19)

$$g = \frac{c}{L} r$$

Sustituyendo el valor anterior en la expresión que nos determina la letra  $m$

$$m = \sqrt{(r+LS)(g+cS)} = \sqrt{rg+rcS+gLS+LcS^2}$$

$$\begin{aligned}
 m &= \sqrt{\frac{c}{L} r^2 + rcS + \frac{c}{L} rLS + LcS^2} \\
 &= \sqrt{\frac{c}{L} (r^2 + 2rLS + L^2S^2)} = \sqrt{\frac{c}{L}} (r + LS) \\
 \Rightarrow Y_0(r + LS) &= \frac{1}{Z_0} (r + LS)
 \end{aligned}$$

Entonces las ecuaciones (18) nos quedarán de la siguiente

forma :

$$\begin{aligned}
 v &= \int^{-1} \left[ E(0,S) e^{-\frac{r+LS}{Z_0} x} \right] \\
 i &= \frac{1}{Z_0} \int^{-1} \left[ E(0,S) e^{-\frac{r+LS}{Z_0} x} \right]
 \end{aligned} \tag{20}$$

Podemos simplificar las expresiones (20) de la siguiente

manera :

$$e^{-\frac{r+LS}{Z_0} x} = e^{-\frac{r}{Z_0} x} \cdot e^{-\frac{LS}{Z_0} x}$$

Además :

$$\frac{L}{Z_0} = \frac{L}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \sqrt{LC}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

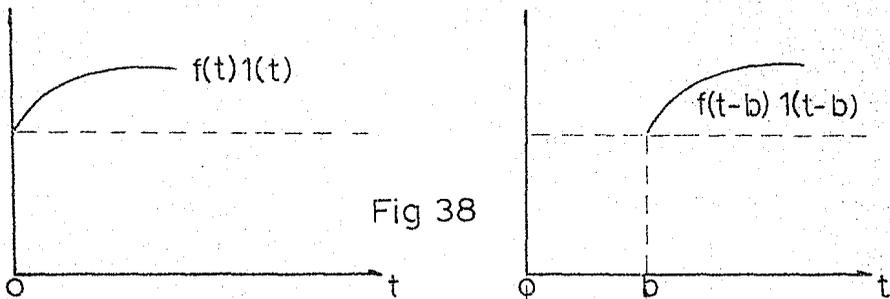
$$\frac{L}{Z_0} = \frac{1}{\mu}$$

Por lo tanto las ecuaciones (20) quedarán en la forma siguiente :

$$v = \epsilon^{-\frac{r}{Z_0} x} \int^{-1} \left[ E(0, S) \epsilon^{-\frac{x}{\mu} S} \right] \quad (21)$$

$$i = \frac{1}{Z_0} \epsilon^{-\frac{r}{Z_0} x} \int^{-1} \left[ E(0, S) \epsilon^{-\frac{x}{\mu} S} \right]$$

Vemos en estas últimas expresiones que en la transformada podemos aplicar el teorema de la translación real, el cual consiste en lo que se indica en la figura 38 :



Si la función empieza en el origen será de la forma  $f(t) 1(t)$ , pero si la función está atrasada un tiempo  $b$  dicha función tendrá la indicación  $f(t-b) 1(t-b)$ . Estos dos casos los vemos claramente en la figura anterior.

Aplicando éste teorema a nuestras expresiones :

$$F(S) \epsilon^{-bS} = \int \left[ f(t-b) 1(t-b) \right]$$

$$\int^{-1} \left[ F(S) \epsilon^{-bS} \right] = f(t-b) 1(t-b)$$

Entonces las ecuaciones 21 tendrán la sig. forma:

$$\int_0^{-1} \left[ E(0, s) e^{-\frac{x}{u} s} \right] = e \left( 0, t - \frac{x}{u} \right)$$

Sustituyendo este valor en las ecuaciones mencionadas:

$$v = e^{-\frac{x}{Z_0} x} \cdot e \left( 0, t - \frac{x}{u} \right) \quad (22)$$

$$i = \frac{1}{Z_0} e^{-\frac{x}{Z_0} x} \cdot e \left( 0, t - \frac{x}{u} \right)$$

Estas ecuaciones nos indican el valor de la onda de sobrevoltaje y de corriente en cualquier punto de la línea por la cual se propagan, lo único que hay que tener en cuenta es la función que nos represente a la variación de la onda en el tiempo, función que debemos determinar para poder aplicar las ecuaciones 22. Estas ecuaciones se aplican para el caso en que la línea no produce distorsión.

Ahora consideremos el caso en que nuestra línea de transmisión no produce distorsión ni pérdidas, lo cual implica que se debe cumplir lo siguiente:

$$r = g = 0$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

De donde:

$$m = \sqrt{LS CS} = S \sqrt{LC}$$

Por lo tanto las expresiones de  $v$  e  $i$  para una línea de transmisión sin distorsión ni pérdidas tienen la siguiente forma:

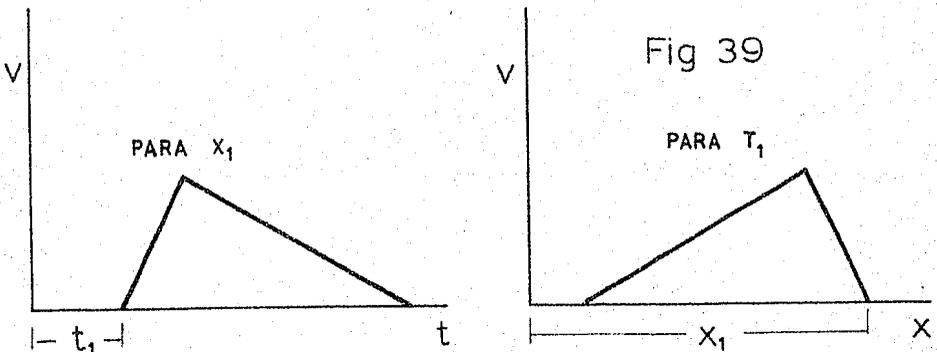
$$v = \varphi \left( 0, t - \frac{x}{\mu} \right)$$

$$i = \frac{1}{Z_0} \varphi \left( 0, t - \frac{x}{\mu} \right)$$

Vemos que en éstas ecuaciones no aparece el término exponencial y por lo tanto no existe atenuación, ya que la línea de transmisión no tiene pérdidas. Si dividimos las dos expresiones entre sí obtenemos el valor de la impedancia característica de la línea.

Cuando se hace el estudio de una onda que se propaga en una línea de transmisión, si se conoce la función que nos representa a la onda en el tiempo, podemos obtener las siguientes gráficas que por sí solas explican claramente el fenómeno de la propagación de las ondas.

A dichas gráficas se les conoce como Diagrama Temporal y Diagrama Espacial, el primero se aplica para un punto determinado de la línea, y el segundo se aplica para un instante determinado.

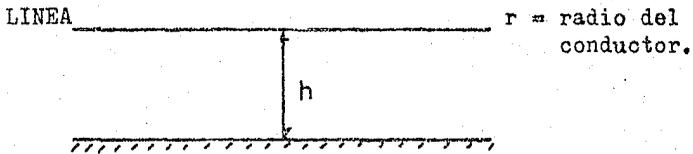


Si se toma en cuenta el amortiguamiento o atenuación, las figuras anteriores se deberán afectar de dicho factor.

Factor de atenuación:

$$\alpha = e^{-\frac{r}{\mu}x}$$

Ahora para determinar lo que se ha indicado como impedancia característica de la línea se puede obtener directamente de las medidas y situación de ella. Supongamos que el siguiente dibujo nos representa una fase de la línea de transmisión:



Sabemos que la expresión que nos proporciona la inductancia por unidad de longitud del conductor está dada por la expresión

$$L = \left( \frac{1}{2} + 2 \ln \frac{2h}{r} \right) 10^{-7} \text{ henry/m}$$

La capacitancia nos la proporciona la ecuación:

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \text{ farads/m}$$

Se ha visto que por la muy alta frecuencia de las ondas y por el efecto superficial en la línea, de la ecuación de la inductancia se puede despreciar el medio quedando por lo tanto la expresión de la impedancia característica en la forma que se indica:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{21 \ln \frac{2h}{r} \times 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}}}}$$

$$Z_0 = \sqrt{3600 (\ln \frac{2h}{r})^2} = 60 \ln \frac{2h}{r}$$

$$Z_0 = 60 \ln \frac{2h}{r}$$

Esta última expresión nos proporciona la impedancia característica de la línea.

La velocidad con que se propagan las ondas ya indicamos que la podemos obtener de la fórmula:

$$u = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{21 \ln \frac{2h}{r} \times 10^{-7} \times \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}}}}$$

$$u = \sqrt{\frac{18}{2} \times 10^{16}} = 3 \times 10^8 \text{ m/seg.}$$

Vemos que la velocidad de propagación de las ondas es del mismo orden que la velocidad de la luz.

Si la onda se propaga por un cable subterráneo la expresión de la velocidad se ve afectada por la constante dieléctrica o coeficiente dieléctrico, del dieléctrico del cable, quedando la expresión de la impedancia característica y de la velocidad de propagación afectados en la siguiente forma:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{2 \ln \frac{R}{r} \times 10^{-7}}{\frac{1}{k18 \ln \frac{R}{r}}}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{3600}{k} \left(\ln \frac{R}{r}\right)^2} = \frac{60}{\sqrt{k}} \ln \frac{R}{r} \quad \Omega$$

$$u = \sqrt{\frac{9 \times 10^9}{k}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{k}} \quad \text{m/seg}$$

La expresión general que se puede aplicar para cualquier tipo de onda es la siguiente:

$$v = V \left( e^{-at} - e^{-bt} \right)$$

Según si la onda es una onda rectangular los parámetros  $a$  y  $b$  serán:

$$a = 0$$

$$b = \infty$$

Si la onda es una senoide:

$$a = -j\omega$$

$$b = j\omega$$

Para el caso específico de una onda producida por una descarga atmosférica su expresión matemática se puede obtener considerando la onda como la suma de dos expresiones exponenciales.

A veces con el fin de simplificar su representación y su estudio, las ondas de sobrevoltaje producidas por rayos se consideran de forma triangular, en la forma como se muestra en la Fig.39

Otro punto que hay que tener en cuenta en una onda ya sea de voltaje o de corriente que se propaga en una línea de transmisión, es el fenómeno de la reflexión y de la refracción de la onda, cuando las características de la línea cambian.

Para determinar los valores de refracción y de reflexión de una onda que pasa por un punto en donde las características de la línea cambian hay que conocer primero la función que representa a dicha onda, también hay que conocer las impedancias de cada una de las partes por donde pasa la onda.

Cuando la onda pasa de una sección de una línea cuya impedancia equivalente es  $Z_0$  a otra parte de la línea cuya impedancia equivalente es  $Z_t$ . La onda que se refleja tiene por valor:

$$V_r = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} V_i$$

En donde  $V_r$  es el valor de la onda reflejada.  
 $V_i$  " " " " " " " incidente.

$$\frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \text{ Es el coeficiente de reflexión.}$$

El coeficiente de reflexión se representa por  $a_{11}^r$

El valor de la onda que pasa al otro extremo de diferente impedancia característica se obtiene con la siguiente expresión:

$$V_t = (1 + a_{11}^r) V_i$$

En donde  $V_t$  es la onda que se refracta,  $V_i$  es la onda incidente,  $(1 + a_{11}^r)$  es el coeficiente de refracción y se representa por  $a_{12}$ .

$$a_{12} = \frac{2 Z_t}{Z_t + Z_0}$$

Para interpretar mejor este fenómeno se hace uso del diagrama de celosía, con el podemos obtener en un momento deter-

minado el sobrevoltaje que se presenta en el punto en donde cambian las características de la línea.

El diagrama de celosía consiste únicamente de dos ejes perpendiculares, en el eje horizontal se representa a la línea de transmisión con sus elementos de diferente característica, cada uno de los segmentos es proporcional a la velocidad de propagación, o más bien al tiempo que tarda la onda de pasar de un segmento a otro, como se muestra en la Fig. 41.

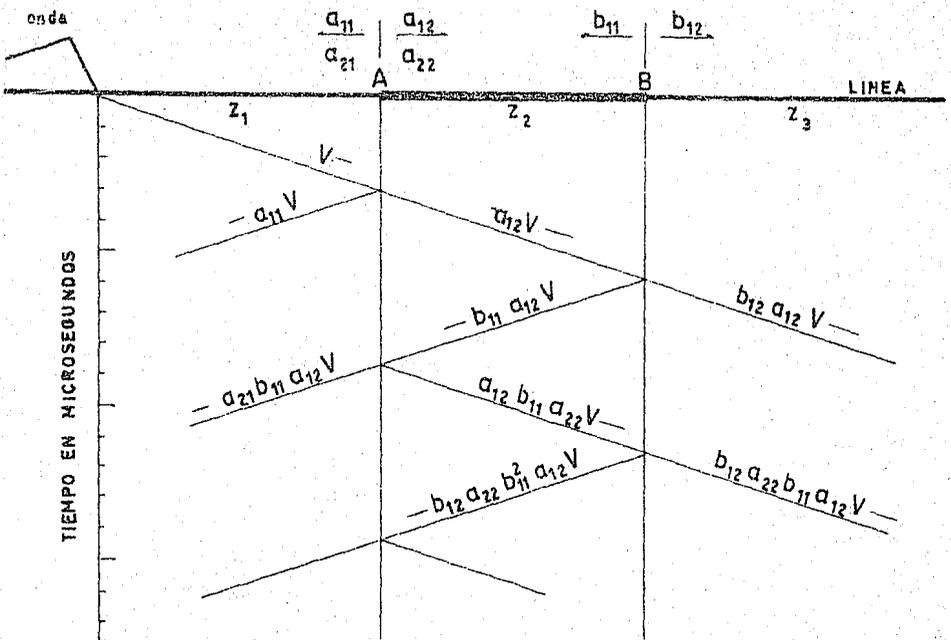
El eje vertical del diagrama de celosía es el eje del tiempo en microsegundos que transcurre durante el cual se realiza este fenómeno.

Como podrá verse en la Fig. 41, de ella se puede obtener el valor del sobrevoltaje en cualquier instante en los puntos en donde cambia la línea de características.

También en el diagrama de celosía se puede introducir el factor de amortiguamiento que vimos anteriormente, con dicho diagrama lo que podemos obtener con bastante aproximación es el valor del sobrevoltaje que se presentará en cualquier punto determinado de la línea de transmisión.

Creo que con esto queda explicado brevemente el estudio de los sobrevoltajes y su propagación en las líneas de transmisión. Ahora pasaremos a analizar las técnicas desarrolladas para la protección de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas y de los sobrevoltajes que producen por éstas en las líneas.

# DIAGRAMA DE CELOSIA



$$a_{11} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

$$a_{12} = \frac{2z_2}{z_2 + z_1}$$

$$a_{21} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}$$

$$a_{22} = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}$$

$$b_{11} = \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2}$$

$$b_{12} = \frac{2z_1}{z_3 + z_2}$$

Fig 41

## C A P I T U L O I V .

### PROTECCION DE LAS LI NEAS DE TRANSMISION Y DE LAS ESTACIONES

En la actualidad se sigue usando la técnica desarrollada hace 20 años sobre el diseño de la protección de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas, la cual consiste en tener en cuenta los siguientes factores:

- 1.- El nivel básico del aislamiento al impulso (BIL)
- 2.- El blindaje de la línea mediante el hilo de guarda.
- 3.- El aterrizado de las torres de transmisión.

Como sabemos las líneas de transmisión se separan de la tierra por medio de distintas clases de materiales, ya sean aisladores de suspensión, el aire; en las subestaciones tenemos los aisladores que soportan a las barras, en los transformadores en la parte externa tenemos los bushings o boquillas y en la interna aceites aislantes.

Los diferentes aislamientos de un sistema eléctrico están conectados en paralelo entre el conductor y la tierra, por lo que todos ellos se encuentran expuestos a las mismas tensiones y sobretensiones las cuales deberán soportar.

Como analicé en el capítulo anterior las sobretensiones de mayor magnitud son las originadas por las descargas atmosféricas, y por estadísticas sabemos que estas sobretensiones han llegado a superar al millón de volts; como indiqué al principio

del primer capítulo, no es posible suministrar a un sistema eléctrico un aislamiento tal que soporte dicha sobretensión cosa que sería antieconómica.

De allí que para poder coordinar el aislamiento entre todos los componentes de un sistema eléctrico, se ha establecido para cada tensión de operación un nivel básico al impulso. Los niveles básicos al impulso son ciertos niveles de referencia expresados en valores de cresta de impulsos de tensión, con ondas con valores de 1.5/40 microsegundos según normas americanas, ó 1.5/50 microsegundos según normas europeas.

Con el nivel básico al impulso podemos unificar el equipo eléctrico para cada tensión de operación.

Para lo anterior es necesario indicar las pruebas a que se debe someter el equipo, las cuales nos indicarán si dicho equipo soportará la tensión de impulso para cada nivel de aislamiento.

Para lo cual se elaboran las curvas de tensión de cresta con la cual se flamea el aislamiento, contra el tiempo que transcurre hasta que se flamea dicho aislamiento.

Estas curvas se determinan en los laboratorios de alta tensión, aplicando una onda de impulso cuyo valor de cresta se aumenta progresivamente hasta que el aislamiento se flamea.

Como se podrá ver en estas pruebas no todos los flameos ocurren en el valor de cresta de la onda, algunos ocurren en el frente de la onda, en este caso para trazar la curva característica se toma el valor de la tensión con el cual se presenta el flameo y el tiempo en que ocurre, si el flameo ocurre en la parte descendente de la onda (véase Fig. 35 del capítulo II), se -

tomará para la curva el valor de cresta de la onda aplicada y el tiempo en que ocurre el flanco. Se sigue aumentando la tensión, hasta que en el valor de cresta ocurre el flanco, a este valor se le ha denominado tensión crítica de flanco al impulso del aislamiento.

Como no se va a estar aplicando al equipo eléctrico esta tensión hasta que flanco se ha establecido un valor menor al cual no debe flamearse el aislamiento.

Teniendo estas curvas para cada elemento del sistema se puede realizar su coordinación con todos los elementos del sistema, ya que el objetivo económico de la coordinación del aislamiento es para garantizar que el sistema operará libre de disturbios dentro de lo posible, con un mínimo de interrupciones por fallas del aislamiento.

Por lo que al coordinar es necesario hacerlo con valores fijos, con los cuales la persona que realiza la coordinación debe tomar un factor de seguridad, dicho factor de seguridad debe tener en cuenta la deterioración del aislamiento debido al envejecimiento, la densidad y humedad del aire, la contaminación del aislamiento, etc. Todos estos factores no son posibles de analizarse matemáticamente. Lo que ha determinado el factor de seguridad es la experiencia, o sea que cuando en un sistema no se tienen interrupciones de energía debidas a sobretensiones nos indica únicamente que el aislamiento se seleccionó con un amplio margen de seguridad.

Para esto no nos indica que tan sobrado quedó el aislamiento. Las frecuentes interrupciones en el suministro de la energía eléctrica, deben analizarse con cuidado y rigurosamente, ya que la frecuencia de éstas puede considerarse como que el equipo no es adecuado, o que el sistema no está siendo operado -

en una forma adecuada, o también dichas interrupciones se pueden atribuir a un aislamiento mal seleccionado.

Las investigaciones más recientes se encaminan atacando al problema del aislamiento desde el punto de vista de la teoría de las probabilidades, del costo de una interrupción por línea y por año, compensándose por los ahorros realizados con la reducción del aislamiento en por lo menos un 10%.

Entonces como se indicó anteriormente para realizar la coordinación del aislamiento, este se debe someter a las pruebas con tensiones de impulso cuya forma de onda haya sido normalizada, la cual describí en el capítulo anterior. Con dichas pruebas obtenemos las llamadas curvas de flameo al impulso, las cuales nos indican la capacidad de cada aislamiento para soportar los impulsos de tensión y así poder seleccionar el aislamiento para un sistema dado. Y como dije en párrafos anteriores se han establecido los niveles básicos del aislamiento según las normas de la NEMA y de la IEEE para cada tensión de operación. Estos niveles se presentan en la tabla I, en la cual también se indican los valores de la tensión a que se deben someter los aparatos del sistema, tanto para las pruebas a baja frecuencia como para las pruebas de impulso.

Los niveles básicos de aislamiento son valores arbitrarios, ya que su selección se basó en los valores promedio de que se disponían en 1941, también se tomó en cuenta las características de flameo al impulso de los diferentes tipos de aisladores.

El fin principal de establecer los niveles de aislamiento fué de que el aislamiento no estuviera desproporcionado para una determinada tensión de operación, lo cual trae como consecuencia que sea más económico el proyecto de una línea de trans

misión.

Ya en un proyecto determinado, teniendo establecida la tensión a la que va a operar la línea de transmisión, de las normas referentes al nivel de aislamiento, se determina el que le corresponde. Y según el tipo de aisladores tomando en cuenta sus características de flameo al impulso-tiempo, podemos determinar el número de los aisladores o de los elementos de que se debe componer cada cadena de aisladores, la cual soportará en cada torre a un conductor.

Como se indicó anteriormente que en el equipo eléctrico hay que realizar pruebas de impulso para determinar su capacidad, no siempre se sabe con certeza el valor de la tensión a la cual va a fallar el aislamiento, por lo que en los valores dados en la tabla I nos indican que si el aislamiento resiste los valores de prueba, dicho aislamiento es adecuado para el nivel de aislamiento indicado en la misma tabla. Y con esto podemos realizar su coordinación.

Ya teniendo seleccionado el nivel de aislamiento, se pasa a determinar la distancia entre los conductores, para la cual existen ya normas establecidas para cada tensión de operación, también debe incluirse la distancia que debe tener el conductor con respecto al cuerpo de la torre, o sea, hay que tener en cuenta el ángulo de inclinación de la cadena y del conductor debido a la desviación que sufre la cadena por la influencia del viento. Debido a un mal dimensionamiento de las cadenas y de la separación del conductor con respecto a la estructura se pueden tener grandes pérdidas por efecto corona.

Se recomienda que la separación entre el conductor y cualquier punto a tierra corresponda a una distancia tal que la tensión de flameo a través del aire sea un 10% mayor que el nivel básico del aislamiento al impulso.

Ya con los datos, de la distancia entre los conductores entre sí y la tierra, se puede determinar el tipo y forma de la torre de transmisión, aunque en realidad, hay que tomar en cuenta también los factores mecánicos tanto de la línea como los de la misma estructura para diseñarla en la forma más adecuada, para cubrir tanto los requerimientos técnicos como los económicos.

Ahora pasaremos a analizar el segundo factor que hay que tener en cuenta en la protección de una línea de transmisión contra las descargas atmosféricas.

## NIVEL BASICO DEL AISLAMIENTO AL IMPULSO

TENSION KV	BIL KV		Nº DE AISLADORES POR CADENA	DISTANCIA A TRAVES DEL AIRE cm	PRUEBAS EN CUCHILLAS, AISLADORES, SOPORTES DE BUS		
					BAJA FRECUENCIA 1 MIN KV	BAJA FRECUENCIA 10 SEG KV	PRUEBA DE IMPULSO 1.5 x 40 MICROSEG. KV DE CRESTA
1.2	30	45	1				
2.5	45	60	1				
5.0	60	75	1				
8.7	75	95	1				
15	95	110	1		50	45	110
23	150		2	19	70	60	150
34.5	200		2	27	95	80	200
46	250		3	34	120	100	250
69	350		5	51	175	145	350
92	450		5	67			450
115	550		6	84	280	230	550
138	650		7	102	335	275	650
161	750		8	118	385	315	750
196	900		10	144	465	385	900
230	1050		12	170	545	445	1050
287	1300		15	213			1050
345	1550		18	257			1350
360	1610		19	267			

# PRUEBAS DE AISLAMIENTO PARA TRANSFORMADORES EN ACEITE

TENSION K V.	BAJA FREC.	PRUEBAS DE IMPULSO.					
	1 MIN. KV. R.M.C.	KV. DE CRESTA DIST. POT.		TIEMPO MIN. PARA EL FLAMEO Dist. Pot. Microsegs.		ONDA COMPLETA 1.5x40 Microseg. KV. de Cresta. Dist. Pot.	
1.2	10	36	54	1.0	1.5	30	45
2.5		54	69	1.25	1.5	45	60
5.0	19	69	88	1.5	1.6	60	75
8.7	26	88	110	1.6	1.8	75	95
15.0	34	110	130	1.8	2.0	45	110
23.0	50	175		3.0		150	
34.5	70	230		3.0		200	
46	95	290		3.0		250	
69	140	400		3		350	
115	230	630		3		550	
	185	520		3		450	
138	275	750		3		650	
	230	630		3		550	
161	325	865		3		750	
	275	750		3		650	
230	460	1210		3		1050	
	395	1035		3		900	
	360	950		3		825	
287	460	1200		3		1050	
330	600	1550		3		1350	
	520	1350		3		1175	

PRUEBA EN BOQUILLAS (BUSHINGS).

TENSION	PRUEBA DE BAJA FRECUENCIA.				PRUEBA DE IMPULSO 1.5 X 40	
	I min.		10 seg.		Kv.	Crestas
	Pequeño	Grande	Pequeño	Grande		
1.2	10		6		30	
2.5	15	21	13	20	45	60
5.0	21	27	20	27	60	25
8.7	27	35	24	30	75	95
15.	35	50	30	45	95	110
23.		70		60		150
34.5		95		80		200
46.		120		100		250
69.		175		145		350
115.		280		230		550
138.		335		275		650
161.		385		315		750
230.		545		445		1050
		465		385		900
		425		350		825
287.						1050
330.						1350
						1175

## EL BLINDAJE DE LA LINEA DE TRANSMISION MEDIANTE EL HILO DE GUARDA

Este otro factor que hay que tener en cuenta en la protección de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas directas, consiste en que sobre éstas se coloca un conductor adicional el cual en cada torre se conecta a tierra, el objeto de este conductor es el de que reciba los impactos directos de las descargas, de tal manera que solo un pequeño porcentaje toque a los conductores de energía.

La función del hilo de guarda es el de servir como una pantalla cubriendo a la línea.

La altura y disposición del hilo de guarda con respecto a los conductores se determina por datos experimentales, o por medio de expresiones empíricas desarrolladas para tal fin, como es el caso de la fórmula de Peek la cual podemos expresar en la siguiente forma:

$$\Delta h \geq 1.1 \left( \frac{X^2}{2H} + X \sqrt{\frac{2h}{H}} \right) \quad \text{m.}$$

En donde:

$h$  es la altura, sobre el suelo del conductor superior.

$H$  es la altura promedio a que se encuentra la nube de donde se origina la descarga atmosférica.

$X$  es la distancia medida horizontalmente entre el hilo de guarda y el conductor superior.

La fórmula anterior se aplica para el caso en que los conductores de energía se encuentren todos en un plano vertical. Aparte de lo anterior se ha establecido que para tener una buena

protección, que el ángulo formado por una vertical que pase por el hilo de guarda y la recta que une al conductor con el hilo, no sobrepase a los  $30^\circ$ , este valor se ha experimentado en modelos a escala de líneas de transmisión.

Aparte de determinar la altura a la cual deberá colocarse el hilo de guarda por medio de fórmulas empíricas, se ha visto que el sistema tiene una buena operación si, como por ejemplo en el caso de que los conductores estén en un plano vertical, que el hilo de guarda se encuentre a una altura sobre el conductor más elevado aproximadamente igual a la distancia entre fases. Lo que sí hay que tener en cuenta es que en el centro del vano (distancia entre dos torres adyacentes) que el espaciamiento sea mayor que la distancia entre fases. De otra manera si cae una descarga en la parte media del vano, la sobretensión en este punto será superior a la que se presenta en la torre y puede producir una salida de operación de la línea.

En el caso de que una descarga caiga en el cable de guarda, la corriente de ésta, pasará por la terminal de tierra de la torre, como hay una caída de tensión en la resistencia de esta terminal y en la resistencia de la tierra, puede presentarse que esta caída de tensión sea superior al nivel de aislamiento de la línea, con lo cual se pueden flamear o hasta destruir las cadenas de aisladores, de aquí la necesidad de que la resistencia de la terminal y la de la tierra de la base de la torre sean de un valor muy pequeño para que no se presente lo anterior.

Como podemos ver en la Fig. 35 del capítulo anterior, - la forma de la onda de la corriente de la descarga nos indica que tiene una variación en su magnitud con el tiempo, esto nos hace que la onda de tensión en el hilo de guarda, nos produzca una tensión inducida de la misma polaridad en los conductores,

por lo que la diferencia de potencial entre el aislamiento no es toda la que aparece en el hilo de guarda.

Esta tensión que se induce en el conductor depende de un coeficiente, al que se le ha denominado como coeficiente de acoplamiento entre el hilo de guarda y los conductores, este valor nos lo proporciona la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\log \frac{b}{a}}{\log \frac{2h}{r}}$$

En donde: C es el factor de acoplamiento.

a es la distancia del conductor al hilo de guarda.

b distancia del conductor a la imagen del hilo de guarda.

h altura del hilo de guarda sobre el piso.

r radio del hilo de guarda.

Las características que deberá reunir el cable de guarda tanto en el material como en su calibre, las determinan principalmente la resistencia mecánica que deberá reunir. En este caso no intervienen para nada las características de tipo eléctrico del cable, ya sea su conductividad, su resistencia, etc.

En la actualidad se está realizando un estudio sobre blindaje de las líneas de transmisión en los Estados Unidos, a este estudio se le ha denominado Proyecto Explorador en el cual participan 12 Compañías Eléctricas.

Este estudio tiene bases matemáticas y experimentales, consiste en determinar la distancia y el mejor ángulo del hilo de guarda, con los cuales el hilo de guarda recibirá el mayor

porcentaje de las descargas atmosféricas. Para lo cual se han colocado en 433 torres de transmisión de diferentes características unos indicadores los cuales registrarán si las descargas ocurren en el hilo de guarda o en los conductores.

El proyecto en cuestión se empezó en 1964, el cual continuará hasta 1971 para tener más datos estadísticos.

De los primeros años de este proyecto se han obtenido algunos datos con los cuales se han elaborado unas gráficas que relacionan la altura del hilo de guarda con el ángulo de blindaje.

A los principios y las relaciones en que se basa este estudio se les ha denominado con el nombre de teoría electromagnética del blindaje, esto es debido a que los parámetros geométricos esenciales deben derivarse de los datos eléctricos.

El hilo de guarda crea algo así como una superficie cilíndrica la cual cubre a los conductores como si fuera una pantalla. El radio de esta superficie cilíndrica es la distancia del hilo de guarda al conductor. Este radio es una función de la corriente máxima o crítica que puede fluir en un conductor de una de las fases sin que se produzca el flameo del aislador.

El radio y la corriente crítica se relacionan mediante una expresión, la cual incluye el tiempo de flameo de los aisladores.

Como se podrán dar cuenta, sobre el blindaje de las líneas de transmisión no se ha dado la última palabra. Ya que aún está en proceso de estudio la disposición del hilo de guarda, con la cual se tendrá un mínimo de interrupciones en la operación de la línea de transmisión, y así asegurar la continuidad

del suministro de la energía eléctrica.

El comportamiento mecánico del cable de guarda es el mismo que el de cualquiera de los conductores. Por lo que su di se ño mecánico es también idéntico al que se aplica para los con ductores.

Su objeto eléctricamente hablando es el de atraer o de interceptar las descargas atmosféricas, impidiendo así que éstas toquen a los conductores.

Para drenar las altas corrientes de las descargas, en cada torre, el hilo de guarda se conecta a tierra por medio de las terminales a tierra. Para que en esta forma se elimine inmediatamente la gran corriente, y no vaya a producir un disturbio en la operación del sistema.

Como la terminal a tierra y la misma tierra presentan resistencia al paso de la corriente, si esta es muy grande puede ser que la caída de tensión sea tan alta que supere al nivel bá sico del aislamiento, y con esta situación dicho aislamiento puede flamearse.

De aquí la necesidad de disminuir la resistencia tanto de la terminal como la de la tierra.

En los párrafos anteriores he estado indicando el tercer factor que hay que tener en cuenta en la protección de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas, el cual consiste en el aterrizado de las torres de transmisión. En este aterrizado se incluye el del hilo de guarda.

El aterrizado de las torres es con el fin de evitar ten siones peligrosas para el personal que por equis razón toque al

del suministro de la energía eléctrica.

El comportamiento mecánico del cable de guarda es el mismo que el de cualquiera de los conductores. Por lo que su di seño mecánico es también idéntico al que se aplica para los con ductores.

Su objeto eléctricamente hablando es el de atraer o de interceptar las descargas atmosféricas, impidiendo así que éstas toquen a los conductores.

Para drenar las altas corrientes de las descargas, en cada torre, el hilo de guarda se conecta a tierra por medio de las terminales a tierra, Para que en esta forma se elimine inme diatamente la gran corriente, y no vaya a producir un disturbio en la operación del sistema.

Como la terminal a tierra y la misma tierra presentan resistencia al paso de la corriente, si esta es muy grande puede ser que la caída de tensión sea tan alta que supere al nivel bá sico del aislamiento, y con esta situación dicho aislamiento puede flamearse.

De aquí la necesidad de disminuir la resistencia tanto de la terminal como la de la tierra.

En los párrafos anteriores he estado indicando el ter cer factor que hay que tener en cuenta en la protección de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas, el cual consiste en el aterrizado de las torres de transmisión. En este aterrizado se incluye el del hilo de guarda.

El aterrizado de las torres es con el fin de evitar ten siones peligrosas para el personal que por equis razón toque al

guna torre y en ese momento por ella esté pasando la corriente de una descarga, con esto se ve la necesidad de que la torre esté al mismo potencial que la tierra, aterrizándola.

Como el terreno en que se apoya la estructura presenta resistencia, por lo anterior es necesario reducir su valor a valores tales, que sean menores o iguales al que se obtiene al dividir el nivel básico al impulso entre 100,000 amperes.

En el caso en que la resistencia del terreno sea superior al valor anterior es necesario reducirla, ya sea dándole un tratamiento, el cual consiste en añadirle sustancias, tales como sales, azufre, carbón, etc.

Si la resistencia del terreno no disminuye en esta forma, es necesario colocar a un lado de la torre varillas sobre las cuales se construye una bobina, una de sus terminales se conecta a la torre. Esto es debido a que algunas veces no es suficiente con colocar las varillas.

Ya en el caso especial en que la resistencia del terreno sea muy elevada, debido a que la constitución del terreno sea rocoso y no sea factible mejorarlo, en este caso se recomienda abrir una zanja en la dirección de la línea de transmisión y colocar en ella un conductor en el cual se conecta cada torre, con esto se puede reducir grandemente la resistencia del terreno.

La resistividad del terreno depende principalmente de su constitución y del tipo de cimentación de las torres. La resistividad del terreno se determina por medio de un Megger de tierras, colocando las terminales de prueba sobre cuatro electrodos alineados sumidos en el terreno a una profundidad igual a  $1/20$  de la distancia entre cada electrodo.

El valor R de la lectura obtenida con el Megger, el -  
cual está dado en ohms, lo aplicamos en la fórmula siguiente:

$$\text{Resistividad} = 2 \pi R a$$

En donde:

R = Lectura del Megger.

a = Distancia entre los electrodos.

Como podemos ver el valor de la resistencia está en -  
ohms-cm.

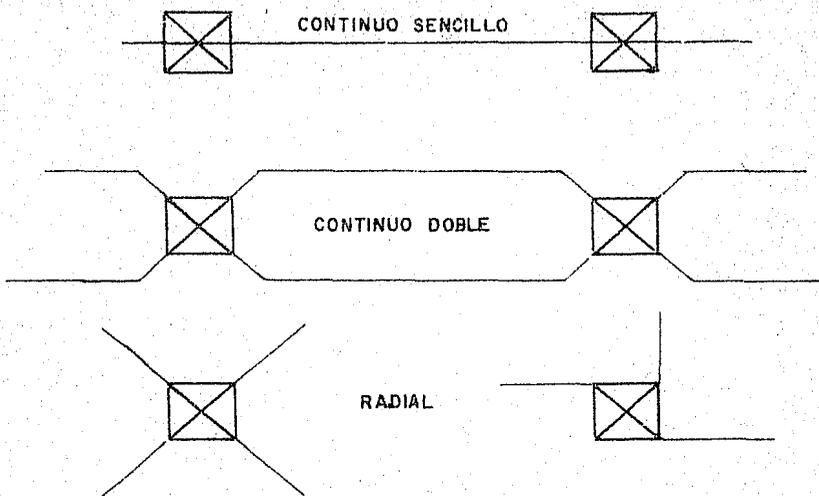
Para cada tipo de terreno se ha determinado un valor -  
promedio de resistividad. Si cuando se mide la resistividad de  
un terreno y no se asemeja al que le corresponde según tablas -  
elaboradas, es necesario preparar el terreno mejorando su resis-  
tencia.

Lo que determina si se da un tratamiento al terreno pa-  
ra disminuir su resistencia es el balanceo económico que debe -  
hacerse entre el costo de la disminución de la resistencia con-  
tra el costo de aumentar el aislamiento.

Para lo cual se han elaborado gráficas que nos indican  
que para determinada resistencia del terreno se debe usar deter-  
minado número de aisladores, también hay que considerar la ten-  
sión de operación así como el tipo de torre.

Ya mencioné anteriormente que uno de los métodos para -  
disminuir la resistencia del terreno era aumentando el área de  
contacto entre la tierra y el sistema de tierra. Esto se logra  
como indiqué en párrafos anteriores, enterrando un conductor en  
la tierra y conectándolo con cada una de las torres.

Este método (en Inglés Counterpoise) puede consistir en un conductor que va enterrado paralelamente a la línea de transmisión, o pueden ser dos conductores continuos paralelos o pueden ser varios saliendo en forma radial de la torre. O puede hacerse una combinación de los anteriores. Esto lo podemos ilustrar en Fig. 41a.



A continuación tenemos una aplicación de los factores -- anteriores en una línea de transmisión en operación, esta es -- de doble circuito, la cual se le denomina circuitos 1 y 3 desde la Planta Hidroeléctrica Cupatitzio hasta la S.E. Carapan y de esta Subestación a la de Irapuato se le denomina circuitos 2 y 4.

La línea de transmisión opera a 161 KV. Sirve para la -- interconexión de la Planta de Cupatitzio con lo que denomina Sig tema Occidental, el cual lo integran las empresas eléctricas -- Compañía Eléctrica Chapala, I.E.M.S.A. y la División Centro-Occidente de la C.F.E.

La Planta Hidroeléctrica Cupatitzio forma parte del Sig tema Hidroeléctrico Gral. Lázaro Cárdenas con una capacidad de 70,000 KW, la cual la proporcionan dos generadores de 450 -- r.p.m., 60 c.p.s. a 13,200 Volts, impulsados por dos turbinas -- tipo Pelton de eje vertical de la marca Ansaldo-San Giorgio, de 53,000 H.P. de 4 chiflones, con un gasto máximo de  $10 \text{ M}^3/\text{Seg.}$  a 450 r.p.m. diseñadas para una caída bruta de 473 Metros. La altura de los generadores con respecto al nivel del mar es de 891 Metros.

Con una generación media anual proyectada de 450'000,000 de KWH. En esta Planta existe un proyecto de instalar una terce ra Unidad de la misma capacidad, ya que en la actualidad no se cuenta con un factor de reserva en la potencia instalada para -- efectos de mantenimiento, con lo cual se podría poner fuera de servicio cualquiera de las unidades sin afectar la demanda del Sistema.

El agua que se aprovecha se almacena en la Presa Cupatitzio que tiene una capacidad de  $4 \times 10^6 \text{ M}^3$ . La cortina es de piedra, arena y arcilla.

El canal tiene una longitud de 9,224 Mts., este canal - conduce el agua a dos tanques de almacenamiento con una capacidad de 92,105 M<sup>3</sup> y 130,000 M<sup>3</sup> respectivamente, los cuales tienen una profundidad de 7.5 Mts.

La tubería de presión es una de las de mayor longitud - ya que tiene 2,017.9 Mts., cuyo diámetro varía de 2.60 a 1.40 - Mts., con espesores de 1/2" a 1.1/16".

El agua que pasó por las turbinas se desaloja a la presa de Jicalán, la cual tiene una altura sobre el nivel del mar de 880 Mts.

Los generadores son de polos salientes marca Siemens, 3  $\phi$ , de eje vertical, con una velocidad de 450 r.p.m. con aislamiento clase B según normas A.S.A. cuya capacidad de régimen es de 35,000 KVA. Con una capacidad permisible de 40,250 KVA, el factor de potencia es de 0.9 con un voltaje de generación de - 13,800  $\pm$  5% Volts. Con conexión en estrella, el punto neutro se conecta a tierra por medio de un transformador de distribución y resistencia de descarga en el secundario.

Tiene su sistema de refrigeración por medio de circulación de agua en radiadores, con resistencias trifásicas para evitar la condensación de la humedad.

Cada generador se conecta directamente a un transformador trifásico I.E.M. con una capacidad de 30,188/40,150 KVA, - con conexión estrella en alta tensión y delta en baja tensión, Con la siguiente relación de transformación:

165025  
161000  
156975  
152950  
148925

ALTA TENSION

Los dos transformadores se conectan directamente a un bus de transferencia de donde salen los circuitos 1 y 3, y a donde llega la línea de la Planta El Cóbano por donde se cierra lo que se llama Anillo Michoacán.

La Planta puede tomar sus servicios propios de cada uno de los generadores, o de la línea que sale de la Planta Zumpimíto y va a la población de Nueva Italia.

Los generadores tienen protección diferencial de sobrecorriente, protección de temperatura en el generador y en las chumaceras, protección contra la pérdida de excitación, protección de sobretensión en el generador.

Los circuitos 1 y 3 van directos a la S.E. de Carapan, tienen una longitud de 69 Km.

Cada fase de cada circuito está constituida por un conductor de aluminio con alma de acero (ACSR) de 397.5 M.C.M. 30 hilos de aluminio y 7 de acero con un diámetro exterior de 20,5 mm.

Los circuitos 1 y 3 son llevados sobre 177 torres cuya altura varía entre 26.3 Mts. a 30.35 Mts. La disposición de una torre de suspensión se muestra en la Fig. 42.

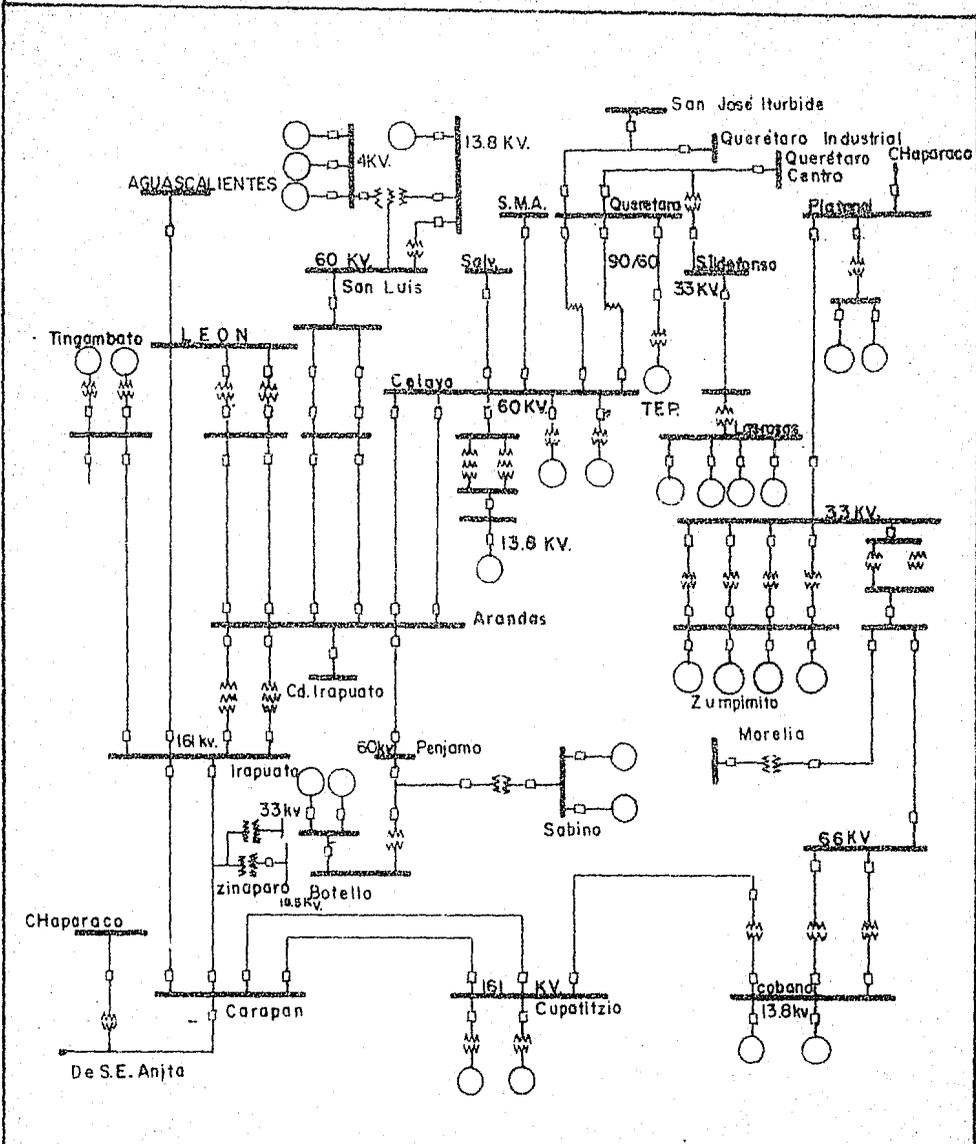
La línea está protegida contra las descargas atmosféricas por dos hilos de guarda con la disposición que se muestra en la Fig. 42. El hilo de guarda es cable de acero galvanizado de 3/8" de diámetro.

El aislamiento de la línea se compone de aisladores de 10"-5 3/4" clase NEMA 52-3, denominado BALL-SOCKET.

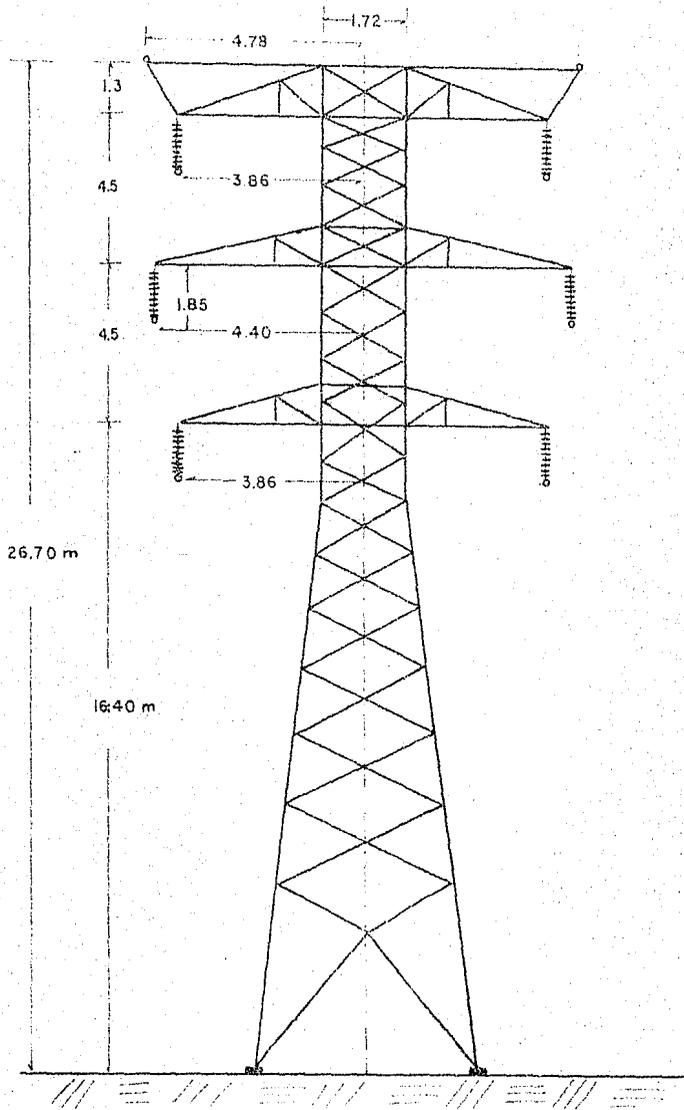
Con una resistencia a la tensión de	15,000 lb.
Resistencia al impacto mecánico	90 inch-lbs.
Prueba de rutina	6,000 lbs.
Flameo a baja frecuencia (seco)	80 KV.
" " " " (húmedo)	50 KV.
Flameo al impulso (+)	125 KV.
" " " (-)	130 KV.
Volt. de perforación a baja frec.	110 KV.
Valor RMS del Volt. de prueba a tierra a baja frecuencia.	10 KV.
Distancia de fuga	11.5 inches
Peso neto máximo	11.5 lbs.

Cada una de las cadenas de aisladores se compone de 11 elementos, lo cual nos proporciona un aislamiento de 880 KV, al flameo en seco.

De la tabla I vemos que para un voltaje de operación de 161 KV. le corresponde un nivel de aislamiento al impulso de 750 KV.



SISTEMA ELECTRICO OCCIDENTAL



TORRE DE SUSPENSION DE LA LINEA CUPATITZIO-CARAPAN  
A 161 KV

Para el valor del nivel básico de aislamiento de 750 KV. la resistencia del terreno debe ser tomando un valor de 100,000 amperes de descargas atmosféricas de  $750,000/100,000 = 7.5$  ohms.

Como la resistencia de la base de las torres es mayor de 7.5 ohms fué necesario tratar de mejorar este valor de resistencia del terreno, usando varillas y bobinas enterradas cerca de las torres y conectando éstas a las bobinas. En esta forma se han podido disminuir valores de resistencia superiores a los 100 ohms, a valores de 10 ohms. En la actualidad se está tratando de reducir más el valor de la resistencia del terreno, se piensa aplicar lo que se conoce como contra-antena (counter pole) para reducir más estos valores.

Esto es debido a que es más caro tratar de aumentar el número de aisladores en cada una de las cadenas para que de esta manera se aumente el nivel básico del aislamiento y se pueda proteger a la línea de transmisión de los sobrevoltajes producidos por las descargas atmosféricas directas.

El factor de acoplamiento que existe entre el hilo de guarda y los conductores en esta línea de transmisión es de:

$$C = \frac{\log \frac{b}{a}}{\log \frac{2h}{r}}$$

De la Fig. 42 de la torre de transmisión tenemos:

$$a = 3.28 \text{ M.}$$

$$b = 50.25 \text{ M.}$$

$$h = 26.70 \text{ M.}$$

$$r = 0.476 \text{ cm.}$$

Por lo tanto el factor de acoplamiento tiene un valor de:

De acuerdo con datos estadísticos tomados por los operadores de la S.E. Carapan el número de tormentas eléctricas por año pasan de 100, ya que la región por donde pasa la línea de transmisión es de un alto régimen pluvial. La distancia promedio entre cada torre es de 390 Mts. con una resistencia a tierra promedio de 10 ohms. y con un nivel básico de 750 KV.

Ahora vamos a determinar el número probable de interrupciones de la línea en cuestión. Primero lo haremos para el caso en que la resistencia a tierra de las torres era de un valor promedio de 40 ohms o sea el valor promedio en el año de 1965, ya que en la actualidad como indiqué este valor ha sido reducido a un valor promedio de 10 ohms.

Los datos necesarios para determinar el número probable de interrupciones son: El nivel isoceraúnico de la región por donde pasa la línea de transmisión es de 100 tormentas anuales, la distancia entre torres o también llamada vano es de 390 Mts. con una resistencia a tierra de las torres de 40 ohms y con un nivel de aislamiento al impulso de 750 KV. tenemos conductor superior en la mitad del vano de 4.2 Mts., y 11 aisladores por cada una.

De las gráficas de la Fig. 43, tenemos:

Una probabilidad de 7 interrupciones por 100 millas por año y un nivel de protección de 58,000 amperes en las torres, y una probabilidad de 7 interrupciones por 100 millas de línea por año y un nivel de protección, de 50,000 Amps. en la mitad del vano.

De donde el número probable de interrupciones anuales -

# CURVAS DE PROBABILIDADES

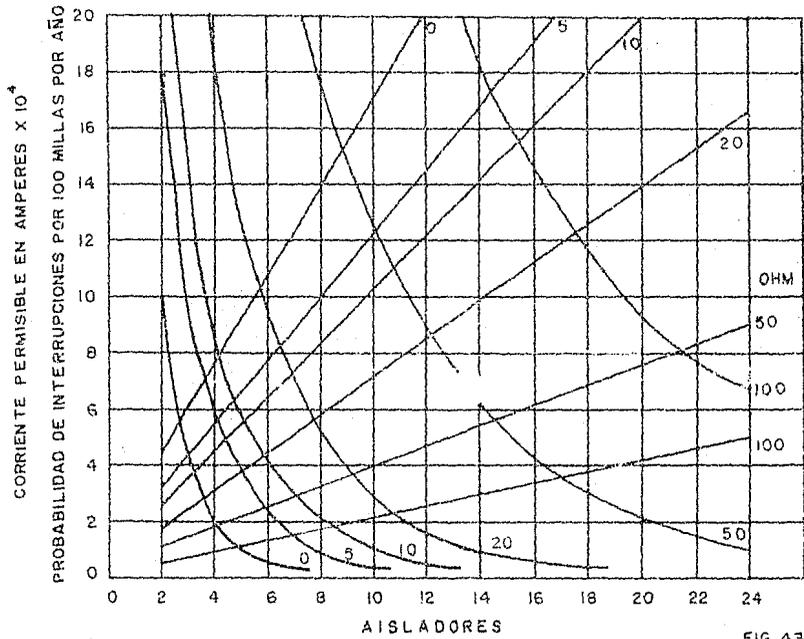
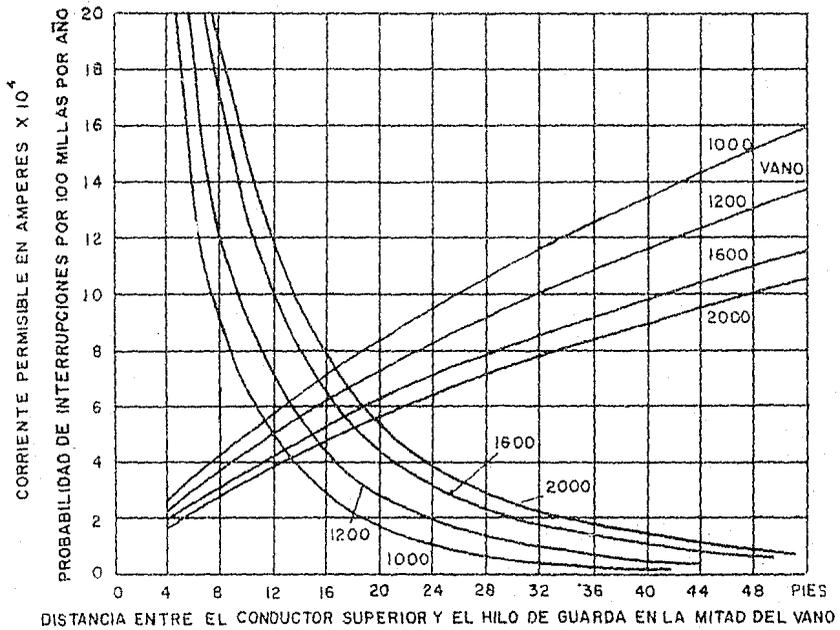


FIG. 43



de la línea con una longitud de 69 Km. es:

$$\left(\frac{7+7}{2}\right) \times \frac{69}{160.9} \times \frac{100}{30} = 10$$

El valor anterior se multiplica por 100/30 debido a que las gráficas de la Fig. 43 se elaboraron para un nivel isokeráunico de 30 tormentas anuales, y el nivel de la región por donde pasa la línea es de 100 como ya se indicó anteriormente.

Entonces vemos que cuando se tenía en el año de 1965 una resistencia a tierra de 40 ohms se tenía un número probable de interrupciones por año de 10.

Este valor determinado por el método anterior se aproxima bastante el valor de las interrupciones registradas en el año de 1965, ya que en este año la línea tuvo 12 interrupciones, este valor lo obtuve de los reportes de fallas de dicho año.

Ahora aplicando el mismo método para el caso actual en el que la resistencia promedio a tierra de las torres es de 10 ohms. Para los mismos datos anteriores de disposición de los conductores, de las gráficas ya mencionadas tenemos:

Una probabilidad de 1 interrupción por 100 millas de línea y un nivel de protección de 90,000 amperes en la torre y una probabilidad de 7 interrupciones por 100 millas por año y un nivel de protección de 50,000 amperes en el centro del vano.

De donde para la longitud de 64 Km. de la línea Cupatitzio-Carapan tenemos:

$$\left(\frac{7+1}{2}\right) \times \frac{69}{160.9} \times \frac{100}{30} = 5.7$$

5.7 interrupciones por año en la línea, este valor también es bastante aproximado ya que de los reportes de fallas del año de 1966 y del presente tenemos un promedio de 6 interrupciones de la línea mencionada debida a las sobretensiones ocasionadas por las descargas atmosféricas directas ya sea en la torre o en el hilo de guarda en la parte media del vano.

Con esto vemos que las curvas de probabilidades nos dan una indicación bastante aproximada de las probabilidades de interrupciones en las líneas de transmisión, las cuales se elaboraron hace más de 20 años.

También nos son muy útiles ya que nos indican el nivel de protección en amperes, valor el cual se puede comparar con el valor de la intensidad de las descargas atmosféricas, valor que se determina por medio de las probetas magnetizables que por medio del cual determinamos dicha corriente.

Para dar una protección completa de los sistemas eléctricos contra las sobretensiones producidas por las descargas directas sobre las líneas de transmisión se logra por medio de los Apartarrayos, o también conocidos como pararrayos.

El objeto de este dispositivo es el de abatir la sobretensión que se presenta en sus terminales, permitiendo el paso a través de sí mismo de grandes corrientes, cuando la sobretensión llega a un valor un poco superior al de operación normal al pasar por un cero la corriente esta se debe interrumpir.

Hasta el momento se conocen tres tipos principales de Apartarrayos y son: Los esplosores de varillas, el pararrayos de expulsión y el pararrayos autovalvular o de resistencia no lineal.

El primer tipo consiste de unos electrodos cuya distancia se puede graduar dependiendo de la protección deseada. Su principio de operación es muy simple, ya que cuando llega a él una onda de sobretensión se produce un arco entre los electrodos, drenándose así la onda de corriente y disminuyendo así el valor de la sobretensión, no permitiéndole que llegue al equipo primario con el que se conecta la línea de transmisión la cual ha recibido una descarga atmosférica.

Además de su simplicidad tiene la ventaja de ser muy económico, el único inconveniente que tiene es que no puede interrumpir el arco después que descargó la onda de sobretensión. Lo cual hace necesario desenergizar la línea de transmisión para interrumpir el arco.

Se han hecho combinaciones explosores con fusibles en serie para poder interrumpir la corriente. Lo cual implica un mayor costo en la reposición de los fusibles.

El segundo tipo de dispositivo de protección es el Apartarrayo de expulsión, el cual consiste de cuatro electrodos, dos de ellos son exteriores y están separados por aire, mientras que los otros dos se encuentran encerrados dentro de un tubo de fibra.

El principio de operación de este dispositivo consiste: en que cuando se presenta en sus terminales una onda de sobretensión, se produce un arco en los dos pares de electrodos por donde se descarga la corriente. Cuando el arco que se presenta en los electrodos interiores toca la pared del tubo de fibra, se produce un gas cuya presión hace que el aire que se ionizó en el momento que salta el arco sea expulsado del interior del tubo.

En el momento en que la tensión llega al valor de operación normal y también en el que la corriente pase por un cero, al no encontrar una trayectoria ionizada debido a que el gas ex pulsó al aire ionizado reestableciéndose así las características dieléctricas del apartarrayo, se interrumpe el arco, quedando - por lo tanto la línea en operación normal.

El tercer tipo de apartarrayos es el autovalvular o de característica no lineal. La ventaja que tiene este apartarrayo sobre los anteriores es que el apartarrayo presenta una resistencia variable en función de la corriente de descarga. Debido a esto la corriente nos queda en fase con la tensión, lo cual - facilita la interrupción de la corriente cuando pasa por valor cero.

Su principio de operación se basa en que para iniciar u na descarga y mantenerla a través de varios pasos angostos tiene que ser mayor que cuando la descarga se libre.

Este tipo de apartarrayo tiene varias distancias de fla meo, las cuales se conectan en serie con el elemento no lineal, como la distancia entre los electrodos o distancias de flameo - por sí solas únicamente pueden interrumpir valores pequeños, de corrientes, por lo que es necesario el empleo de un dispositivo que en el momento en que el apartarrayo empiece a descargar pre sente muy poca resistencia, y cuando la tensión va a llegar a - su valor máximo, dicho elemento debe presentar una resistencia muy alta para que de esta manera se interrumpa el arco quedando por lo tanto la línea en operación normal.

Se han elaborado diferentes elementos cuya resistencia disminuye cuando aumenta la corriente, el material con que se - construyen por lo general es un material cerámico que reúne las características mencionadas.

Es decir que el material debe tener una característica volts-amperes como la que se muestra en la Fig. 44. En donde vemos que para cuando la tensión en sus terminales alcanza un valor determinado y para evitar que la sobretensión aumente todavía más, debe dejar pasar una corriente muy grande, aumentando un poco más la tensión en sus terminales, como se muestra en la parte ab de la Fig. anterior, y en el momento en que la tensión empieza a bajar, la intensidad de la corriente debe disminuir como se muestra en la Fig. antes mencionada.

En el momento en que la tensión vuelva a su valor normal debe interrumpirse el arco en un valor de la tensión un poco mayor que la tensión de operación. Ya que de no ser así se presenta el problema de que el pararrayos estaría continuamente descargando.

Existen otros tipos de pararrayos que se han elaborado para el fin prescrito, entre estos tenemos el que se denomina de película de óxido, el cual consiste en una serie de discos de metal cuyas superficies se pintan con un barniz aislante, en la parte que separa los discos se llena de peróxido de plomo, y de esta manera se coloca una serie de discos según sea la tensión de operación de la línea en la que se va a instalar.

Cuando la tensión en las terminales del pararrayo excede a la que puede resistir el barniz aislante, este se perfora permitiendo que se descargue a través del peróxido, como el calor desarrollado por la descarga hace que por punto perforado se convierta en un elemento muy aislante, cuando la tensión regresa al valor normal, este elemento aísla el punto del barniz en donde se realizó la descarga.

Otro tipo de pararrayos que se elaboró fué el de bolas, el cual en lugar de discos como el tipo anterior se hicieron u-

nas pequeñas bolitas aisladas, dichas bolitas son de peróxido de plomo, por lo que el principio de operación de este tipo es similar al principio del apartarrayo del tipo anterior.

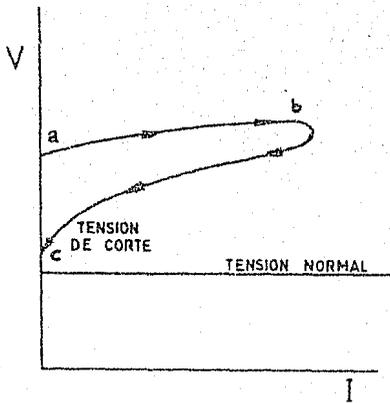
En la actualidad para la supresión del arco se usa el método conocido como sople magnético, el cual consiste en que la -corriente de descarga al pasar por unos discos ferromagnéticos -hace que se magneticen instantáneamente, de tal manera que el -campo magnético así creado desvía al arco aumentando su longitud con lo cual al paso por un cero de la corriente ésta se puede interromper. Este método se está aplicando ampliamente en Europa -para los sistemas eléctricos que operan en lo que se conoce como extra altos voltajes (E H V), que en la actualidad el valor más alto es el de 750 KV, para lo cual en la Fig. 44 se muestra un apartarrayos para ese valor de tensión de operación.

Para tensiones superiores a los 400 KV se están aplican-do apartarrayos con entre-hierros con sople magnético, ya que se ha demostrado que tienen una operación adecuada. Estos tipos de apartarrayos disponen de capacitores de control y resistencias -de control para asegurar una distribución uniforme del potencial bajo cualquier circunstancia.

En la actualidad tiene más aplicación el apartarrayos autovalvular, del cual se ha hecho una selección de ellos según -sea su aplicación en: Apartarrayos tipo línea, el apartarrayos tipo estación y el apartarrayos tipo distribución.

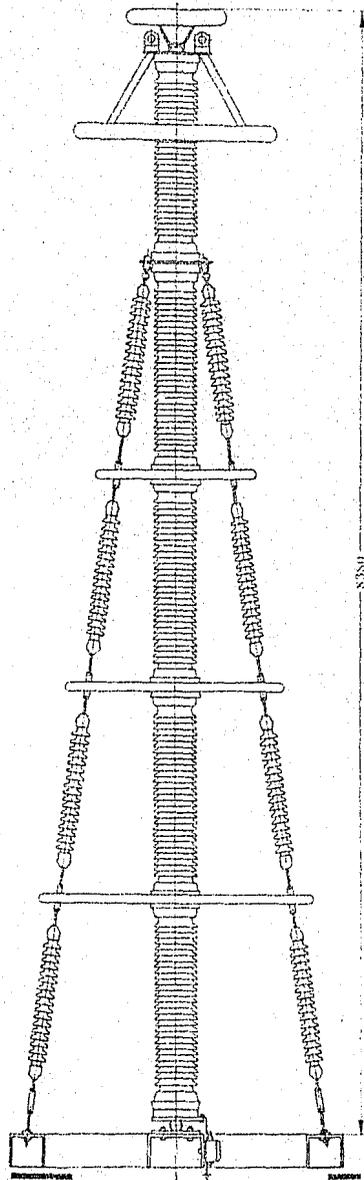
De la selección anterior se comprende fácilmente la aplicación de cada uno de dichos apartarrayos.

En la selección de los apartarrayos hay que tener presente ciertos términos muy usados como son:



CARACTERISTICA DE UN  
APARTARRAYOS

FIG. 44



APARTARRAYOS PARA 750KV

La tensión residual, la cual no es más que la caída de tensión que se presenta en las terminales del apartarrayo cuando esta está descargando la onda de sobretensión que se le presenta.

Otro término es el nivel de protección que ofrece el apartarrayo, y no es más que el valor de cresta más alto que puede presentarse en sus terminales, entre el valor de la tensión residual. También hay que tener en cuenta el máximo valor de cresta de la corriente de descarga que puede drenar sin sufrir ningún deterioro.

Además en la selección de los apartarrayos, hay que tener en cuenta las pruebas a que deben someterse para poder decir si son adecuados para una aplicación determinada.

Estas pruebas que deben hacerse con los apartarrayos son las siguientes:

Determinar la curva característica de flameo al impulso del dispositivo, también la característica de flameo a la frecuencia fundamental que en nuestro caso, la frecuencia es de 60 c.p.s., tomando en consideración dichas características tanto en un ambiente húmedo como seco.

Determinar los valores de tensión residual del apartarrayos para diferentes valores de corrientes de descarga. Además la determinación de la máxima corriente que podrá soportar sin sufrir ningún deterioro.

También se deben realizar las pruebas anteriores de impulso con ondas de diferentes relaciones de duración.

Teniendo determinados los valores anteriores, la selec-

ción final la fija el tipo de aterrizado del sistema.

Es decir el tipo de apartarrayos por usar lo determina la relación  $X_0/X_1$  que no es más que el valor de la relación de la reactancia de secuencia cero del sistema hasta el punto en donde se piensa instalar el pararrayos, entre el valor de la reactancia equivalente de secuencia positiva del sistema hasta el punto en cuestión.

Como se vió en el capítulo II, este valor de  $X_0/X_1$  depende de la forma como se conecten los neutros tanto de los generadores como de los transformadores. En el mismo capítulo se indican los rangos de estos valores según el tipo de aterrizado.

La selección de la tensión del pararrayos en la práctica se basa en que ésta sea un 5% mayor de la tensión máxima eficaz que se presente entre línea y tierra cuando ocurre una falla a tierra.

Dicha tensión nos determina si el apartarrayo por usar debe ser del 75, 80 y 100%. Este valor corresponde al valor de la tensión que se presenta en el punto de una falla a tierra y es el valor referido en por ciento al valor de la tensión entre fases. Es decir  $V_s/V_1$  en donde  $V_s$  es el valor de la sobretensión producida por la falla monofásica a tierra y se determina en la forma indicada en el Capítulo II, en donde se tratan los diversos sobrevoltajes que se pueden presentar en un sistema eléctrico.

$V_1$  es el valor de la tensión de operación a la frecuencia fundamental entre fases.

Cuando la relación de  $X_0/X_1$  está comprendida entre 0 y + 3, de la fórmula del capítulo II que nos proporciona el valor

de la sobretensión producida por un corto-circuito monofásico a tierra, la cual es:

$$\frac{V_s}{V_n} = a^2 = \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2}$$

Sustituyendo el valor de  $X_0/X_1$ , vemos que:

$$V_s = 1.4 V_n$$

Ea decir que la sobretensión en este caso de conexión del neutro a tierra es 1.4, 140% de la tensión de línea a tierra, y este valor comparado con respecto a la tensión entre fases es igual a 0.8 o lo que es lo mismo un 80% del valor de la tensión entre fases.

Esto nos indica que de acuerdo con la clasificación de los apartarrayos, que para este sistema con un aterrizado de sus neutros, de tal manera que la relación  $X_0/X_1$  sea igual a 3, podemos emplear un apartarrayos del 80%.

Si el valor de la relación  $X_0/X_1$  es igual a un valor comprendido entre 0 y 1, tenemos de la fórmula anterior que la tensión que se presenta es igual a  $1.25 V_n$ , la cual relacionándola con la tensión entre fases es igual a 0.75 o 75% de  $V_{\phi}$ . De aquí que para un tipo de conexión de los neutros tal que  $X_0/X_1$  sea igual a 0 ó a la unidad, podemos emplear el tipo de apartarrayos conocido como de 75%.

Esto nos implica un ahorro en estos tipos de apartarrayos, ya que son de un menor costo, además de que cuando se verifica que  $X_0/X_1$  tiene un valor entre 0 y 3 podemos emplear lo que se conoce como nivel de aislamiento reducido.

Esto quiere decir como por ejemplo, para un sistema operando a 161 KV, de la tabla I le corresponde un B.I.L. de 750 - KV, y el nivel de aislamiento reducido consiste en aplicar un nivel inferior al anterior el cual sería de 650 KV, lo que supone una reducción del aislamiento y por lo tanto es más económico el proyecto de una línea de transmisión, debido a que se pueden emplear cadenas de aisladores, con un número menor, de tal manera de tener un nivel de aislamiento, correspondiente al nivel inmediato inferior del que le correspondería de acuerdo con la tabla I.

Ahora en el caso de que los neutros del sistema en cuestión están aislados, lo cual indicaría que  $X_0/X_1$  tiende al infinito en la fórmula antes dicha tenemos que  $V_s/V_n$  es igual a - - 1.707 del valor de  $V_n$  o sea un 170.7% de la tensión de línea a neutro.

Este valor de  $V_s$  comparado con  $V_1$  es igual a la unidad o sea igual al 100% de la tensión entre fases. Por lo que en este caso se puede aplicar un apartarrayos del 100%.

En el caso en que la relación  $X_0/X_1$  tuviera un valor - comprendido entre menos infinito y menos doce se nos pueden presentar valores de sobretensión cuyo valor es varias veces la tensión entre fases, lo cual nos indica que en estas condiciones el apartarrayos podría fallar, si no se le da un B.I.L. apropiado.

Para facilitar la selección de los apartarrayos se han elaborado unas gráficas las cuales muestran una familia de curvas, las cuales se han encontrado muy útiles en la selección de la capacidad de los apartarrayos.

Las curvas mencionadas representan la relación de  $X_0/X_1$  contra  $R_0/X_1$ . Para lo cual se presenta una de dichas gráficas -

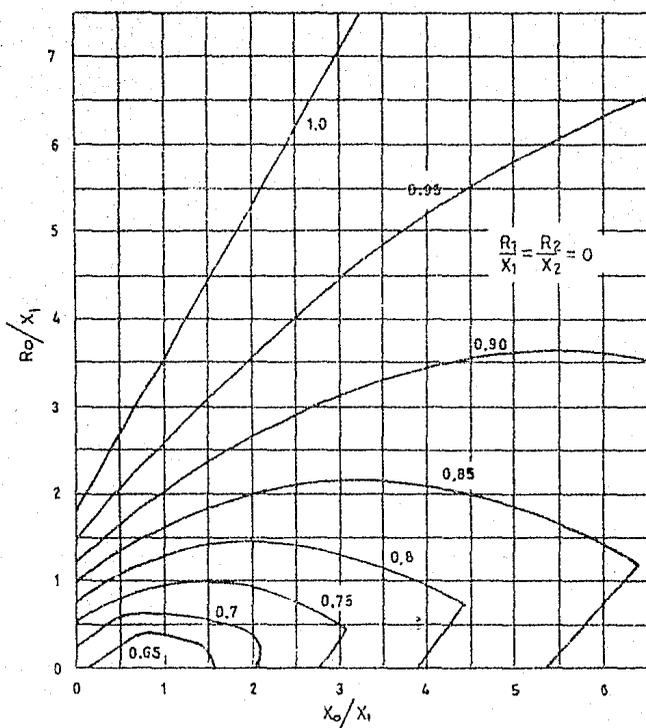
en la Fig. 45. En donde podemos ver el caso en que la relación  $X_0/X_1$  es igual a 3 y  $R_0/X_1$  es igual a 1, tenemos que el punto -- corresponde a la curva marcada con 0.8, lo cual nos indica que el apartarrayo por usar debe ser del 80%.

En la forma anterior se selecciona la capacidad del apartarrayo. Nos queda por lo tanto tomar en cuenta el lugar apropiado en donde se deben colocar, cuando son apartarrayos del tipo estación. Para esto se recomienda que dichos dispositivos estén cerca del equipo por proteger ya que las razones para esto son dos: Primero existe la posibilidad de que una descarga -- caiga entre el apartarrayo y el equipo por proteger, cosa que ya se ha registrado en varias ocasiones, y por lo tanto el apartarrayo no tendrá la capacidad para limitar el voltaje del equipo a valores seguros. La otra razón consiste en que si el apartarrayo se encuentra muy retirado del equipo, abatirá la sobreten-- sión a un valor inofensivo, pero en las terminales del equipo -- aumentará por reflexión de dicha onda, y por lo tanto el voltaje resultante podrá ser mayor que el voltaje en las terminales del apartarrayo.

Una aproximación para determinar la distancia máxima -- que debe existir entre un apartarrayo del tipo estación y el equipo primario, puede expresarse como un pie por cada KV del -- circuito usando apartarrayos de capacidad plena y también de -- B.I.L. completo.

Por ejemplo para un sistema operando a 161 KV, la máxi-- ma distancia a que se puede colocar el apartarrayo es de 161 -- pies.

También se han elaborado tablas para determinar la máxi-- ma distancia a que debe colocarse cada apartarrayo, dependiendo de la tensión de operación, el B.I.L., y también de su capaci-- dad.



CURVAS PARA LA SELECCION DE LA  
CAPACIDAD DE LOS APARTARRAYOS

BIBLIOGRAFIA.

- ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK.  
Westinghouse.
- LIGHTNING ARRESTER -ENGINEERING INFORMATION.  
Westinghouse.
- REDES ELECTRICAS.  
Zoppetti.
- APUNTES DEL ING. Jacinto Viqueira Ianda.
- LIGHTNING EFFECTS ON TRANSMISSION LINES.  
S.B.Griscom. I.F.E.E.
- ELECTRIC POWER TRANSMISSION.  
Woodruff.