

## SOBRETENSIONES Y COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO.

### GENERALIDADES.

Un aspecto importante a considerar en el diseño de las instalaciones eléctricas que forman parte de los sistemas eléctricos, es el relacionado con las sobretensiones que pueden causar daño a los equipos y ser origen de otras fallas en el sistema y lo relacionado con la protección contra estas sobretensiones por medio de la denominada coordinación de aislamiento.

Para tener una idea más amplia sobre este problema y aplicar mejores criterios de diseño, es conveniente establecer algunas definiciones relacionadas con el tema y, dadas por la Comisión Internacional de Electrotecnia en su norma IEC- 71 de 1976 y sus anexos posteriores, así como los conceptos relacionados con las sobretensiones en los sistemas eléctricos.

### AISLAMIENTO.

Se denominara aislamiento de una instalación exterior (intemperie) o de un aparato eléctrico al elemento que tiene la aptitud de soportar la tensión, o más general los esfuerzos dieléctricos que le son aplicados.

Este elemento denominado aislamiento, es un material o arreglo de materiales que cumplen con esta función y que puede ser líquido (como aceites por ejemplo), gaseoso (SF<sub>6</sub>) o sólidos (resinas sintéticas, algodón, hule, derivados del petróleo, polímeros, elastómeros, etc.).

En las redes eléctricas y para propósito de diseño, se establece una diferencia entre aislamiento tipo externo y aislamiento tipo interno en los aparatos y en las subestaciones. Dentro de los aislamientos internos se pueden mencionar como ejemplo los aceites, papel, cinta de lino, etc. de los transformadores, el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), el aceite o aire comprimido utilizado en los interruptores. Dentro de los aislamientos externos se tienen principalmente las distancias en aire a tierra (aisladores de porcelana, vidrio, resina sintética, y su relación con respecto a las puntas conectadas a tierra), así como las distancias en aire entre partes vivas (de fase a fase) en las instalaciones eléctricas y líneas de transmisión.

### ESFUERZOS DIELECTRICOS APLICADOS SOBRE LOS MATERIALES.

Entre las sollicitaciones dieléctricas se distinguen dos categorías:

- Sollicitaciones normales, debidas a la tensión eléctrica normal de servicio prevista.
- Sollicitaciones dieléctricas excepcionales, llamadas generalmente sobretensiones, que exceden en magnitud a la máxima tensión de servicio pero solo aparecen ocasionalmente y cuya duración es insignificante comparada con la vida útil esperada del aislamiento.

Los esfuerzos dieléctricos aplicados sobre los materiales son de origen muy variado y es posible que tengan una duración del orden de microsegundos con amplitudes de tensión elevadas o tiempos del orden de minutos y hasta horas con valores de tensión no muy altas y formas de onda senoidales, por lo que es necesario analizar la amplitud y la duración de las sobretensiones productoras de los esfuerzos dieléctricos en los materiales aislantes.

Un análisis breve de la naturaleza y características más importante de estas sollicitaciones, se hace a continuación: las sollicitaciones que se presentan en los sistemas eléctricos pueden ser:

- Sobretensiones de origen atmosférico o por rayo.
- Sobretensiones por maniobras de interruptores.
- Sobretensiones temporales a la frecuencia del sistema.
- Tensión a la frecuencia del sistema en las condiciones normales de operación, es decir sin que excedan a las tensiones máximas de diseño del equipamiento, lo que equivale al régimen permanente de operación sin perturbaciones.

#### *Aclaración:*

- a) *Debe hacerse hincapié en que la denominaciones utilizadas para designar las clases de sobretensiones es mas bien convencional y no responde necesariamente a consideraciones sobre su origen. Es bien cierto que, por ejemplo, la mayoría de las sobretensiones originadas por maniobras caen naturalmente dentro de las "sobretensiones de maniobra", pero hay ocasiones en que por su forma y duración deben en cambio ser clasificada en le grupo de "sobretensiones temporarias a frecuencia de red". Existen*

además algunos casos marginales a los que no hay más remedio que asignar la clase en forma más o menos arbitraria, con la guía del sentido común y la experiencia.

- b) Además de las solicitaciones dieléctricas que acabamos de mencionar los aislamientos de los aparatos de un sistema de energía eléctrica deben soportar otras que influyen sobre su comportamiento como aislantes eléctricos. A estas solicitaciones se las suele designar con la denominación genérica de "condiciones de servicio" e incluyen tanto fenómenos aleatorios que pueden afectar ciertos aislamientos solo en forma temporaria (condiciones atmosféricas, contaminación ambiente, etc.) como procesos que pueden modificar la propia naturaleza de los materiales aislantes que los integran (envejecimiento, Calentamiento excesivos, etc.)

#### Sobretensiones de origen atmosférico o por rayo.

Estas sobretensiones son debidas a las descargas atmosféricas y por lo general se manifiestan inicialmente sobre las líneas de transmisión pudiendo ocurrir:

Por descargas o rayos directamente sobre la línea de transmisión.

Por descargas o rayos sobre las estructuras (torres o postes) o sobre los hilos de guarda en las líneas de transmisión.

Por descargas a tierra (suelo) en las proximidades de la línea de transmisión.

Este tipo de sobretensión presenta una duración muy breve, del orden del centenar de  $\mu s$ , con una pendiente inicial muy elevada, hasta alcanzar un valor máximo al cabo del orden de  $1 \mu s$ , para decrecer luego mucho mas lentamente hasta anularse (fig. 1).

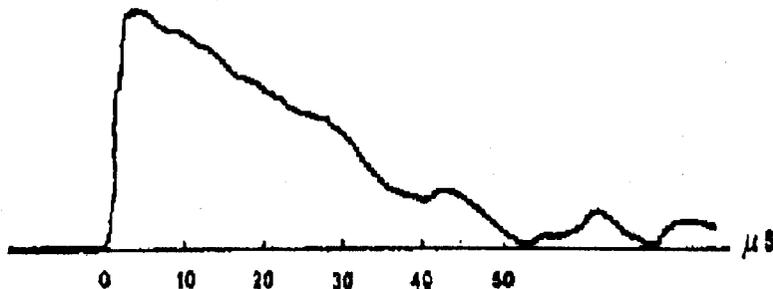


Fig. 1.- Sobretensión atmosférica.

#### Sobretensiones de maniobra transitorias.

Las sobretensiones de maniobra transitorias son de breve duración y casi siempre fuertemente amortiguadas. su duración puede ser del orden de 2 a 3 milisegundos y la pendiente inicial es mucho menor que las sobretensiones atmosféricas, con una duración del frente del orden de varios cientos de  $\mu s$ . Su origen es por lo general, el cierre o la apertura de un interruptor o la aparición de una falla (fig. 2), es decir un cambio de configuración del sistema.

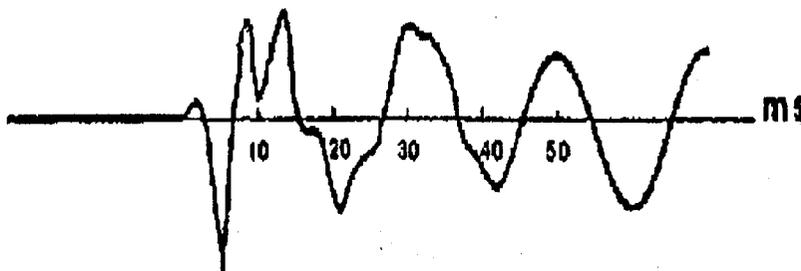


Fig. 2.- Sobretensión de maniobra.

### Sobretensiones temporales.

Por ultimo, las sobretensiones temporales son de duración relativamente larga y se presentan en forma de oscilaciones débilmente amortiguadas y frecuencia del mismo orden que la de servicio, su duración oscila entre 30 milisegundos a unos pocos segundos, la característica mas importante de las sobretensiones temporarias es su naturaleza oscilatoria. Pueden ser debidas a ciertas maniobras de interruptores, tales como las que producen la desconexión de cargas importantes, fallas monofásicas o bifásicas, o debida a ferresonancia en circuitos no lineales (fig. 3).

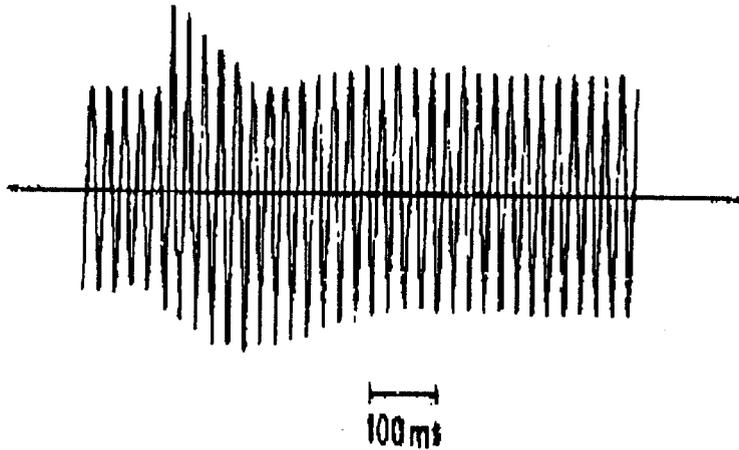


Fig. 3.- Sobretensión temporal.

### Características principales de una descarga atmosférica.

La primera etapa de una descarga atmosférica a tierra, es una predescarga de ionización por lo general luminiscente que se propaga de la nube hacia el suelo (tierra) por medio de canales de descarga que pueden tener longitudes variables en metros entre uno y otro. La velocidad media de propagación de esta predescarga tiene una magnitud de tiempos entre dos ondas sucesivas del orden de  $0,15 \text{ m}/\mu\text{seg}$ .

La punta de la predescarga se considera como una fuerte concentración de cargas en el aire que crea un intenso campo electrostático, produciendo un cierto numero de descargas por efecto corona en el área ionizada.

Cuando el canal más lejano de la descarga se acerca a tierra, se verifica una fuerte concentración de cargas positivas de un punto del suelo y en algún momento, parte una descarga semejante hacia arriba. El encuentro se da a una altura que se estima esta entre 15 y 20 metros del nivel del suelo, en este punto se produce el rayo (descarga y retorno).

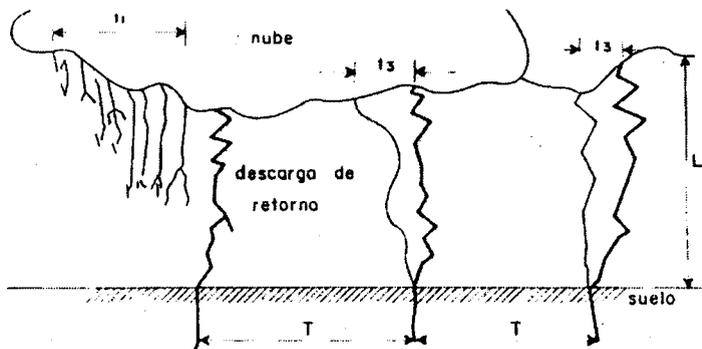


Fig. 4.- Formación de la descarga de retorno y subsucesentes.

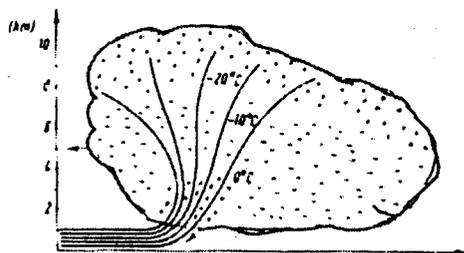


Fig. 5.- Distribución de la carga eléctrica en una nube según la teoría de Simpson

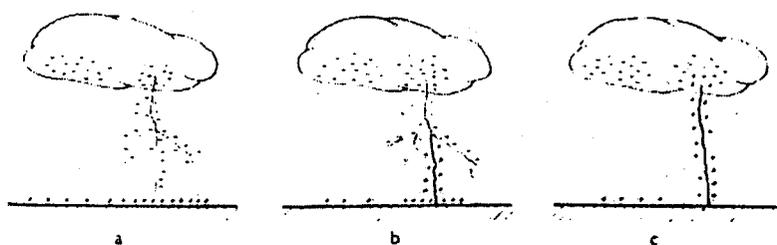


Fig. 6.- representación esquemática de los fenómenos relativos a la formación de un rayo.

- El gradiente de potencial supera la rigidez dieléctrica del aire y las cargas negativas se mueven hacia tierra.
- Formación de la descarga de retorno.
- La descarga de retorno alcanza la nube.

La descarga de retorno que toma una fuerte intensidad luminosa y posteriormente en trueno, es aquella que interesa de modo particular desde el punto de vista de la protección en las instalaciones eléctricas, ya que el fenómeno de descarga sucesivas se puede repetir varias veces después de la descarga principal y las estadísticas demuestran que más del 50% de los rayos tiene al menos dos descargas, habiéndose encontrado algunos tienen más de 40 descargas sucesivas.

Aproximadamente el 90% de las corrientes de rayos son negativas (nube negativa, suelo positivo) y un 10% con polaridad contraria, pero estas representan las más severas, encontrándose magnitudes de corriente entre 5 y 100 KA llegándose a encontrar hasta de 200KA.

El conocimiento de las características principales del rayo es de fundamental importancia para el establecimiento de medios eficaces de protección, aunque es evidente la enorme dificultad que representa la determinación experimental de las características del rayo, ya que este de hecho es un fenómeno casual difícilmente reproducible y que tiene cantidades que no pueden ser fácilmente evaluadas a priori. El único elemento común a todas las descargas atmosféricas es su polaridad (de la corriente del rayo) que es unidireccional y no oscilatoria y de los aspectos relevantes de las mediciones estadísticas resulta que en general las características de las ondas de corriente medida, se encuentran dentro de los siguientes valores.

Duración del frente de onda de 0,5 a 20microsegundos  
 Duración al semivalor de la cola de 15 a 90 microsegundos.  
 Duración de la cola de 300 a 300.000 microsegundos.

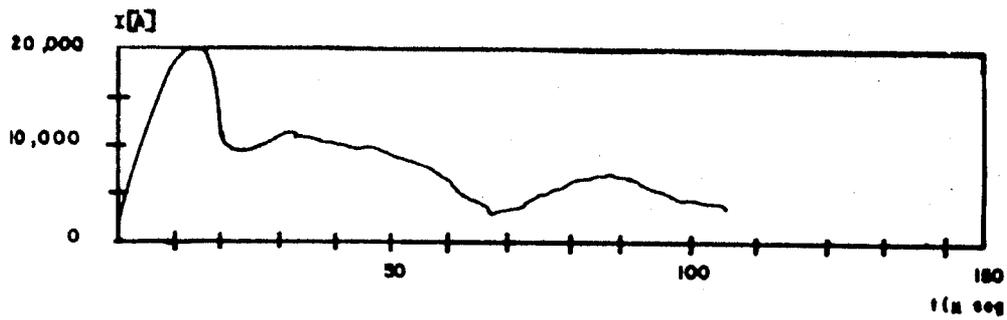


Fig. 7.- Primera parte de la descarga de un rayo.

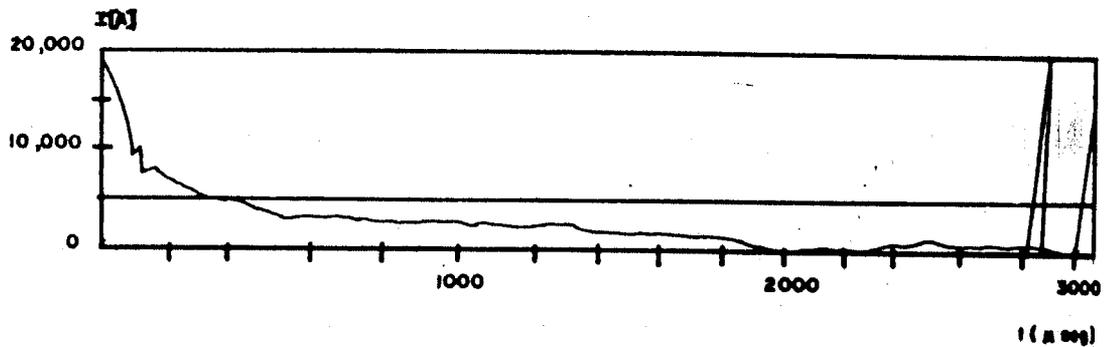


Fig. 8.- Descarga completa de un rayo.

Descarga de rayos directamente sobre la línea de transmisión.

Cuando un conductor de línea es sometido a un descarga directa, la corriente del rayo se inicia en el conductor mismo circulando hacia los dos sentidos a partir del punto de descarga. Si se denota con  $i$  la corriente del rayo y con  $Z_0$  la impedancia característica de la línea, la tensión que aparece con respecto a tierra es:

$$V = Z_0 \frac{i}{2}$$

Esta tensión se propaga en los dos sentidos en forma de onda viajera y tiene la misma forma que la onda de corriente.

La impedancia característica de una línea de transmisión se calcula como:

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

Siendo  $L$  la inductancia en Henrios/km y  $C$  la capacitancia en Faradios/km

Los valores de impedancia características para líneas de transmisión son del orden de 300 a 500 ohm y en los cables de 40 a 150 ohm.

Si se supone una línea de transmisión con una impedancia característica de 400 Ohm y una descarga de rayo de 10 kA entre conductor y tierra, ver figura 9, la tensión que se presentará es de:

$$V = \frac{400 \times 10.000}{2} = 2000 \text{ kV}$$

Una tensión tan elevada seguramente que provoca una descarga en las cadenas de aisladores en el punto mas cercano al punto de la descarga, ver figura 10.

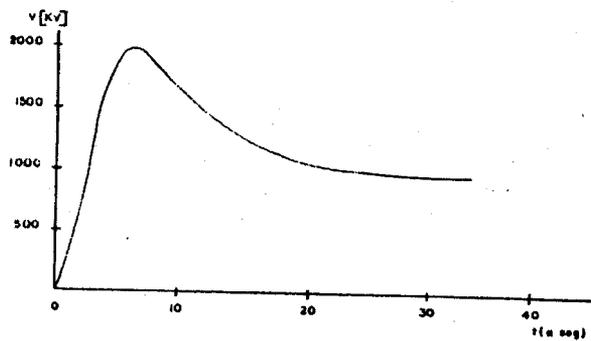


Fig. 9.- Forma típica de una descarga sobre un conductor de línea (onda completa).

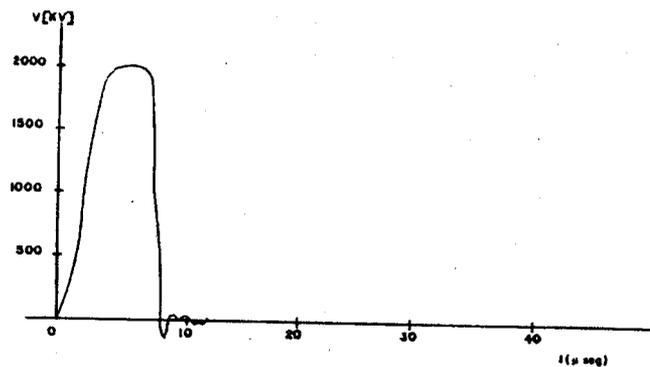


Fig. 10.- Onda cortada como consecuencia de un arco en la cadena de aisladores de una línea.

Descarga o rayos sobre las estructuras (torres o postes) o sobre los hilos de guarda.

Cada torre o poste de una línea de transmisión representa una resistencia efectiva con respecto a tierra  $R$  y una inductancia  $L$ , si un rayo cae directamente sobre una torre o poste (metálico), ver figura 11, la descarga  $i$  de corriente a tierra provoca una diferencia de potencial entre la parte superior de la estructura y la tierra, dada como:

$$V = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

La resistencia  $R$  se puede modificar por medio de electrodos especiales de conexión a tierra o por tratamiento del terreno, la inductancia típica de una torre es del orden de 10 micro henrios.

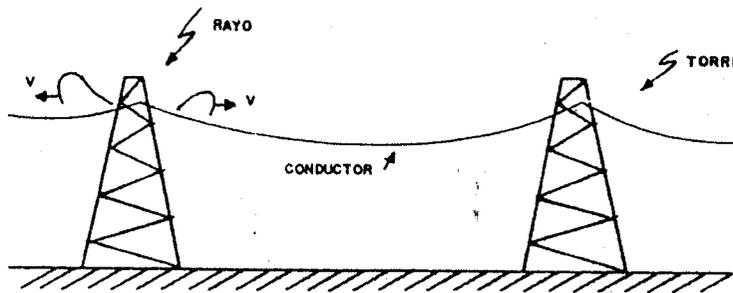


Fig. 11.- Descarga sobre la estructura.

Descarga sobre los hilos de guarda.

Si un hilo de guarda se ve sometido a una descarga atmosférica en el punto de unión en la torre o entre dos torres, parte de la corriente del rayo fluye en cada una de las direcciones, ver figura 12, a lo largo del hilo de guarda y parte se va por la torre o torres más cercanas al punto de la descarga.

En algunos casos y bajo ciertas condiciones, se han calculado las distribuciones resultantes de la corriente y de la tensión, y se ha encontrado que la diferencia de potencial que se manifiesta entre los hilos de guarda y los conductores de la línea genera un frente y una cola mas corta de aquellas que aparecen en la corriente del rayo, pero manteniendo la forma. El valor de la diferencia de potencial entre torres y conductor, es función también de la inductancia y resistencia del pie de la torre, aunque depende también de la impedancia característica del hilo o hilos de guarda y de la longitud del claro. Estas sobretensiones se manifiestan en los conductores de fase por lo que valen las consideraciones hechas para este caso.

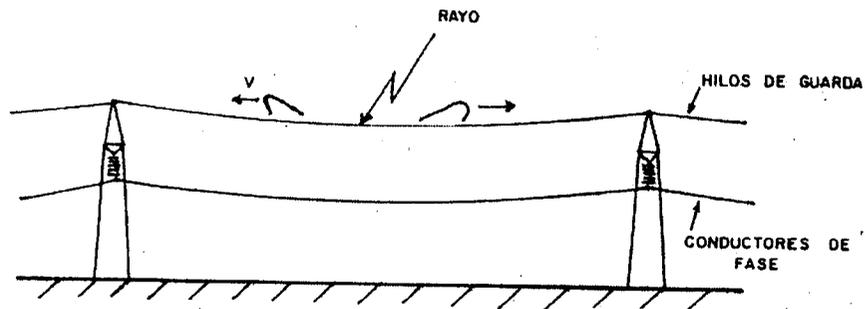


Fig. 12.- Descarga sobre los hilos de guarda.

Descarga a tierra en las proximidades de las líneas de transmisión.

Estas descargas también se conocen como indirectas y desde el punto de vista probabilístico son más frecuentes que las anteriores. Este tipo de descarga no toca a los conductores de fase ni a los hilos de guarda, pero si a la tierra (suelo) cercana a la línea de transmisión.

Anteriormente se mencionó que cuando una descarga negativa se acerca a la tierra, en el terreno se acumula una carga positiva, si por ejemplo se tiene conectado a la línea un transformador con algunos de sus devanados, conectado en estrella con el neutro a tierra, algunas de las cargas electrostáticas pueden fluir al conductor a través de la conexión a tierra, la acumulación de estas cargas no modifican aún el potencial del conductor que se mantiene a tierra a través del neutro del transformador durante todo el proceso de formación de la descarga. Cuando se presenta el rayo entre nube y tierra como consecuencia de la rápida neutralización de las cargas en el canal conductor, las cargas positivas electrostáticas que se encuentran sobre en el conductor, dan inicio a un transitorio indirecto, ver figura 13.

Estos transitorios son en su gran mayoría de polaridad positiva y se manifiestan sobre todos los conductores en una forma de tensión prácticamente del mismo valor de cresta. La forma de onda de la tensión transitoria

indirecta se asemeja a aquella de la corriente del rayo , pero la duración a la cresta es mayor ( del orden de 10 microsegundos, mientras que el tiempo de cola puede estar entre los 30 y 100 microsegundos. La amplitud de la onda de sobretensión por descarga indirecta es proporcional a la altura de los hilos de guarda, habiéndose encontrado por ejemplo que para líneas de clase 15 kv en general es inferior a 100kv con valores máximos en casos excepcionales de hasta 200kv.

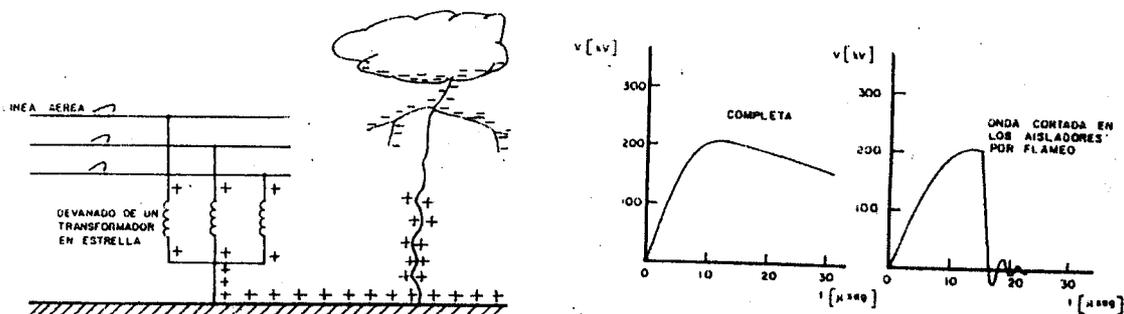


Fig. 13 .- Representación de una descarga indirecta al suelo y la onda de descarga indirecta.

Ondas de sobretensión atmosféricas que llegan a las subestaciones.

Las ondas de sobretensión que por descarga atmosférica (rayo) se presentan en las líneas de transmisión, se propagan a través de éstas con una cierta atenuación (función de la distancia de propagación y del efecto corona) figura 14.

Si una onda viajera de amplitud  $V_c$  llega a la subestación, produce una sobretensión de valor:

$$V_s = \frac{2 \cdot V_c}{n}$$

Siendo  $V_c$  el valor de cresta de la onda incidente y  $n$  el numero de líneas que llegara a la subestación. De manera de que si a una subestación llegan dos líneas de transmisión, la sobretensión que se presenta es el valor de cresta de la onda incidente, por lo que el nivel de aislamiento de la subestación debe ser superior al nivel de aislamiento de la línea o por lo menos igual si se considera que la subestación tiene una buena protección. Por el contrario, en el caso de una subestación que llega una sola línea de transmisión, es decir que  $n = 1$  se presentara una sobretensión de valor doble de la onda incidente que puede producir la ruptura dieléctrica, cosa que probablemente no ocurra en la línea de transmisión, esto conduciría a pensar en un sobreaislamiento exagerado de algunos equipos, particularmente los transformadores, por lo que la instalación y correcta selección de los descargadores es indispensable.

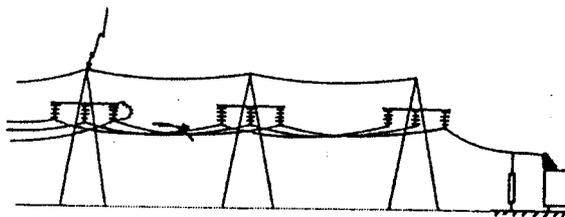


Fig. 14 .- La mayoría de los impulsos de sobretensión llegan a la subestación.

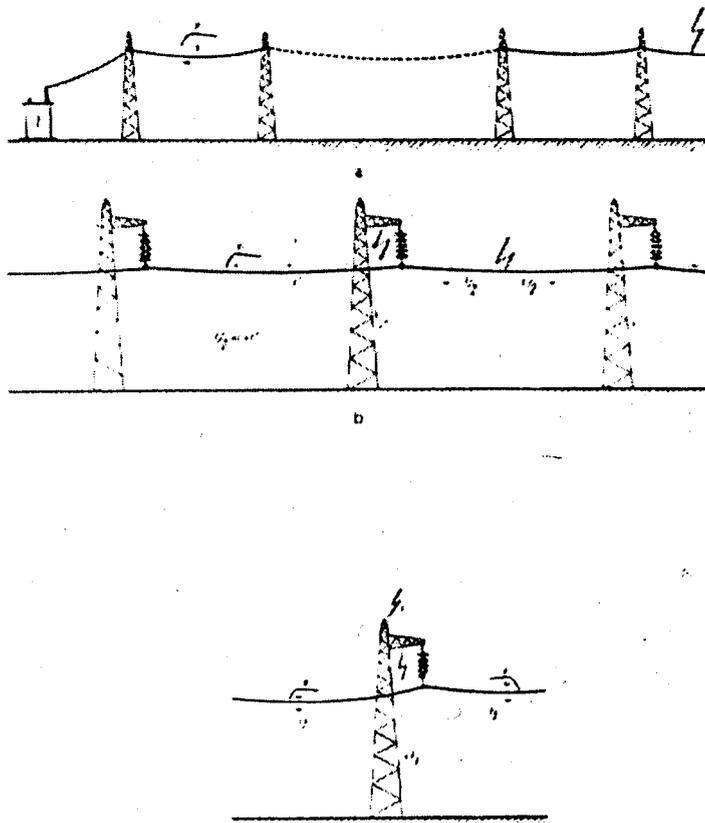


Fig. 15.-

- a) Si la sobretensión es inferior al nivel de aislamiento de la línea se propaga completa hasta el final de esta.
- b) Si la sobretensión es superior al nivel de aislamiento de la línea se corta en la primer estructura.

La tensión de valor doble de la onda incidente puede afectar también a interruptores, reconectadores, seccionadores y cuchillas si la línea se encuentra abierta, se puede observar que la tensión que aparece entre los terminales puede tener dos componentes:

Una es la onda del rayo que llega por la línea y es amplificada por las reflexiones y otra que es la sobretensión a la frecuencia del sistema en la red a la que esta conectada la subestación, por lo que el valor de cresta de la tensión que aparece en los terminales de los aparatos en la subestación tiene un valor absoluto máximo  $V_t$  dado por:

$$V_t = 2 \cdot V_c + V_m \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Donde:

$V_c$  = amplitud de la sobretensión del lado de la línea.

$V_m$  = tensión máxima entre fases a la frecuencia del sistema.

## LA COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO.

Por coordinación de aislamiento se puede entender en términos generales, como las disposiciones y precauciones que se deben tomar en el diseño de las instalaciones eléctricas que están expuestas a sobretensiones para evitar que las maquinas y aparatos eléctricos en general puedan sufrir daños por efectos de estas sobretensiones. Se trata entonces de contener estas sobretensiones dentro de límites tolerables evitando por un lado fallas frecuentes y por el otro un costo demasiado elevado de los aparatos de protección. Desde el punto de vista de proyecto, es necesario establecer una relación entre la tensión nominal de operación de una instalación, la tensión de ruptura dieléctrica de los aparatos por proteger y las características de los dispositivos de protección contra las sobretensiones. Resulta obvio que se debe tender a una normalización de las características de las redes eléctricas en función de estos términos correlativos y de aquí que resulte oportuno en esta parte dedicar un poco de espacio para aclarar algunas ideas al respecto, por medio de las definiciones basadas en la norma de la Comisión Internacional de Electrotecnia. IEC 71 de 1976, y la norma IRAM 2211 de 1972, IRAM 2211 I de 1985 y IRAM 2211 II y III de 1988.

### Definiciones:

#### Aislamiento externo:

Comprende las superficies aislantes externas de los aparatos, del aire ambiente que los rodea y de las distancias en aire. La rigidez dieléctrica del aislamiento externo dependen de las condiciones atmosféricas tales como la contaminación, la humedad etc..

#### Aislamiento interno:

Comprende aislamientos internos sólidos, líquidos o gaseosos que forman parte del aislamiento de los equipos que están protegidos de los efectos atmosféricos, tales como contaminación, humedad, etc. y otras condiciones externas.

#### Aislamiento externo tipo interior.

Es el aislamiento externo que esta diseñado para operar dentro de los edificios y consecuentemente no esta expuesto a las condiciones ambientales.

#### Aislamiento externo tipo exterior.

Es el aislamiento externo que esta diseñado para operar fuera de los edificios y consecuentemente esta expuesto a las condiciones ambientales.

#### Aislamientos autorrecuperable.

Es el aislamiento que recupera totalmente sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva causada por la aplicación de una tensión de prueba, un aislamiento de este tipo es por lo general, aunque no necesariamente un aislamiento externo.

#### Aislamientos no autorrecuperable.

Es el aislamiento que pierde sus propiedades aislantes o que no las recupera completamente después de una descarga disruptiva causada por la aplicación de una tensión de prueba, un aislamiento de este tipo es por lo general, aunque no necesariamente un aislamiento interno.

#### Sistema con neutro aislado.

Es un sistema cuyo neutro no tiene ninguna conexión intencional a tierra, excepto a través de aparatos de señalización, de medición o de protección, de muy alta impedancia.

#### Sistema con neutro conectado a tierra.

Es un sistema que esta conectado a tierra ya sea directamente o a través de una resistencia o una reactancia de un valor suficientemente bajo, con el propósito de reducir al máximo las oscilaciones de una protección selectiva de falla a tierra.

#### Sistema aterrizado resonante.

(Sistema conectado a tierra por medio de una bobina de supresión de arco).

Es un sistema conectado a tierra a través de un reactor cuya reactancia es de un valor tal que durante una falla de fase a tierra, la corriente inductiva a la frecuencia del sistema que circula a través del reactor neutraliza sustancialmente a la componente capacitiva a la frecuencia del sistema de la corriente de falla a tierra.

Factor de falla a tierra.

Durante una falla a tierra, en un punto seleccionado de un sistema trifásico, (por lo general en el punto de instalación de un equipo) y para una configuración dada de un sistema con neutro conectado a tierra, se define el factor de falla a tierra de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F.f.t. = \frac{\text{valor eficaz máximo de tensión de fase a tierra durante la falla (de la o las fases no falladas)}}{\text{valor eficaz de tensión de fase a tierra (en condiciones normales de operación)}}$$

Aclaración:

- a) Este factor es una relación (mayor que 1) y caracteriza en términos generales las condiciones de conexión a tierra de un sistema, como es visto desde el punto seleccionado, independientemente del valor de tensión de operación en este punto. El factor de falla a tierra es el producto de  $\sqrt{3}$  y el "factor de conexión a tierra", el cual se ha usado en el pasado.
- b) El factor de falla a tierra se calcula de las impedancias de secuencia del sistema, como se ve desde el punto seleccionado y usando para cualquier maquina rotatorias las reactancias subtransitorias.
- c) Si para cualquier configuración del sistema, la reactancia de secuencia cero es menor que tres veces la reactancia de secuencia positiva y la resistencia de secuencia cero no excede la reactancia de secuencia positiva, el factor de falla a tierra no será mayor que 1,4, es decir:

$$\text{Si } X_0 \leq 3 X_1 \text{ y } R_0 \leq X_1 \quad F.f.t. \leq 1,4$$

Para el caso mencionado anteriormente el "factor de conexión a tierra" sería menor o igual a 0,8

Sobretensión:

Cualquier valor de tensión (en función del tiempo) entre una fase y tierra o entre fases que tengan un valor de cresta o valores que lo excedan (obtenidos de la tensión máxima de diseño del equipo,  $\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_m, \sqrt{2} \cdot V_m$ ).

Sobretensión de fase a tierra por unidad (p.u.).

Es la relación de los valores cresta de la sobretensión de fase a tierra y la tensión de fase a tierra correspondiente a la tensión máxima de diseño para el equipo (es decir,  $\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_m$ ) también se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Sobretensión de fase a tierra p.u.} = \frac{\text{Valor de cresta de sobretensión de fase a tierra}}{\text{Tensión de fase a tierra correspondiente a la tensión máxima de diseño del equipo}}$$

Sobretensión de fase a fase por unidad (p.u.).

Es la relación de cresta de la sobretensión de fase a fase y la tensión de fase a tierra correspondiente a la tensión máxima de diseño del equipo (es decir  $\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_m$ ).

Esta relación estará expresada por:  $K \cdot \sqrt{3} K$ , siendo K la relación entre el valor cresta de la sobretensión de fase a fase y la tensión máxima de diseño del equipo, también se puede expresar de la forma siguiente:

$$\text{Sobretensión de fase a fase} = \frac{\text{Valor de cresta de la sobretensión de fase a fase}}{\text{Tensión de fase a tierra correspondiente a la tensión máxima de diseño del equipo}}$$

El valor de cresta de la tensión máxima del equipo (es decir el valor menor en p.u. de una sobretensión de fase a fase) estará entonces expresado en un valor por unidad como  $1.\sqrt{3}$

**Aclaración:**

Las sobretensiones en p.u. definidos anteriormente, para los propósitos del estudio de coordinación de aislamiento, se refieren a los valores de cresta de tensión correspondiente de fase a tierra de la tensión máxima de diseño del equipo, tomada como base de referencia.

Cuando las sobretensiones se miden en varias condiciones durante las pruebas sobre un sistema o sobre un modelo equivalente, pueden ser conveniente referir estas sobretensiones a la tensión de fase a tierra antes y después de la operación de maniobra del interruptor, como es apropiado en tales casos, el término de "factores de sobretensión" debería ser usado para la relación, y como las sobretensiones no son proporcionales a la tensión del sistema, es necesario establecer estas últimas así como las condiciones de la prueba.

**Sobretensiones por maniobra.**

Para una sobretensión de fase a tierra o de fase a fase en un punto dado del sistema debida a una operación especificada de maniobra de interruptores, falla u otra causa, la forma como puede referirse para los propósitos de coordinación de aislamiento es semejante a aquella del impulso normalizado usada para las pruebas de impulso de maniobra. Tales sobretensiones tienen por lo general un alto amortiguamiento y corta duración.

*Aclaración : La onda normalizada es de 250/2500  $\mu$ seg.*

**Sobretensión por rayo.**

Para una sobretensión de fase a tierra o de fase a fase en un punto dado del sistema debida a una descarga atmosférica (rayo) o alguna otra causa, la forma como puede referirse para los propósitos de coordinación de aislamiento es semejante a aquella del impulso normalizado usada para las pruebas de impulso de rayo. Tales sobretensiones son por lo general unidireccionales y de muy corta duración.

*Aclaración : La onda normalizada es de 1,2/50  $\mu$ seg.*

**Sobretensión temporal.**

Es una sobretensión oscilatoria de fase a tierra o de fase a fase en un punto dado de un sistema que tiene una duración relativamente grande, la cual no esta amortiguada o tiene un débil amortiguamiento.

Las sobretensiones temporales están por lo general originadas por operaciones de maniobra o fallas (rechazo de carga, fallas de fase a tierra), y/o por efecto de no linealidades (como efectos de ferresonancia o armónicas). Estas sobretensiones se pueden caracterizar por su amplitud, su frecuencia de oscilación, por el tiempo total de duración o por su decremento.

**Principios básicos de coordinación de aislamiento.**

La coordinación de aislamiento comprende la selección de la resistencia dieléctrica del equipo y su aplicación, con relación a las tensiones que pueden aparecer sobre el sistema, para las cuales el equipo esta diseñado y tomando en consideración las características de los dispositivos de protección disponibles, así como reducir a un nivel económico y operacional aceptable la probabilidad de que los esfuerzos por tensión resultantes e impuestos al equipo, puedan causar daño al aislamiento del mismo o afectar la continuidad del servicio.

### Efectos de tensión y otros efectos que afectan al aislamiento.

Las siguientes clases de esfuerzos dieléctricos se pueden presentar durante la operación de un equipo:

- Tensiones a la frecuencia del sistema bajo condiciones normales de operación, es decir, que no excedan de la tensión máxima de diseño del equipo.
- Sobretensiones temporales.
- Sobretensiones de maniobra.
- Sobretensiones por rayo.

Para un esfuerzo de tensión dado el comportamiento de un aislamiento interno puede estar afectado por su grado de vejez y para un aislamiento externo por su grado de contaminación atmosférica.

### Clasificación de tensiones máximas para los equipos.

Para los propósitos de estas recomendaciones para la coordinación de aislamiento los valores normalizados para las tensiones máximas de diseño del equipo se dividen en las siguientes.

Categoría A.

Tensiones mayores de 1 kV y hasta 52 kV

Categoría B.

Tensiones mayores de 52 kV y hasta 300 kV

Categoría A.

Tensiones mayores de 300 kV

### PRUEBAS DIELECTRICAS.

Los siguientes tipos de pruebas dieléctricas se consideran para los aislamientos de maquinas y aparatos eléctricos:

Prueba de corta duración a la frecuencia del sistema (1 minuto).

Prueba de larga duración a la frecuencia del sistema.

Pruebas de impulso de maniobra.

Prueba de impulso de rayo.

*Aclaración:*

*Las dos primeras pruebas son realizadas con ondas senoidales a frecuencias del sistema (50 o 60 Hz.)*

### PRUEBAS DE IMPULSO DE MANIOBRA.

La onda normalizada de maniobra es también de forma de impulso, con 250 microsegundos para llegar al máximo de tensión y 2500 microsegundos para llegar al 50% del máximo de tensión en la cola (fig. 16).

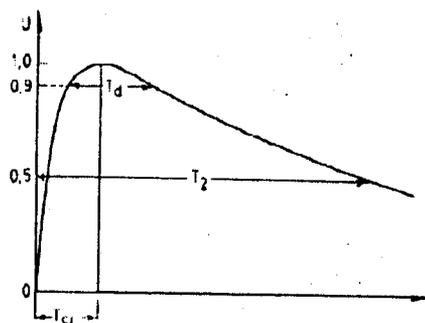


Fig. 16 .- Parámetros que definen un impulso de maniobra

### PRUEBA DE IMPULSO DE RAYO.

La onda normalizada de impulso atmosférico es de 1,2 microsegundo para llegar al máximo de tensión, y 50 microsegundos para llegar al 50% del máximo de tensión, en la cola (fig. 17).

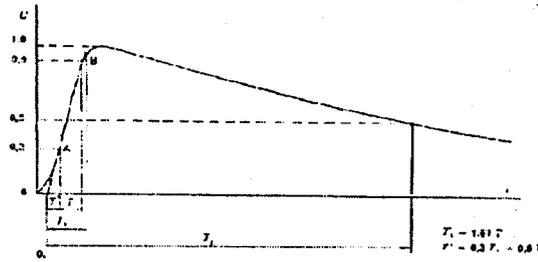


Fig. 17 .- Parámetros que definen un impulso de tensión tipo rayo.

- Duración convencional del frente ( $T_1$ ).
- Origen convencional del impulso ( $O_1$ ).
- Duración convencional hasta el valor mitad ( $T_2$ )
- Valor de la tensión de ensayo, que es el valor de cresta de impulso.

#### Aclaración:

- la selección de las pruebas dieléctricas puede ser diferente de acuerdo con las categorías de tensiones A, B o C y pueden estar afectada por el tipo de equipo.
- Categoría A y B.

*El comportamiento de los aislamientos bajo tensiones de operación a la frecuencia del sistema, sobretensiones temporales y sobretensiones por maniobras:*

- Se verifica en forma general por pruebas de corta duración a la frecuencia del sistema.

*El comportamiento bajo tensiones por rayo:*

- Se verifica con las pruebas de impulso de rayo.

*El envejecimiento de los aislamientos internos y la contaminación sobre los aislamientos externos, cuando estos puedan afectar el comportamiento bajo condiciones de operación a la frecuencia del sistema y sobretensiones, se verifica por pruebas de larga duración a 50 Hz.*

- Categoría C.

*El comportamiento de los aislamientos bajo tensiones de operación a la frecuencia del sistema, sobretensiones temporales y sobretensiones por maniobra, se verifica por las siguientes pruebas:*

- Bajo tensiones de operación a la frecuencia del sistema sobretensiones temporales con pruebas de larga duración a 50 Hz. estas pruebas también ayudan a demostrar el comportamiento del equipo con relación al envejecimiento (aislamientos internos) y a la contaminación (aislamientos externos).

*El comportamiento bajo tensiones por maniobra, se verifica:*

- Con pruebas de impulso de maniobra

*El comportamiento bajo tensiones por rayo se verifica:*

- Con pruebas de impulso de rayo.

En adición a las definiciones anteriores conviene agregar algo más con relación a los niveles de aislamiento y de protección. Con respecto a los niveles de aislamiento se puede mencionar que básicamente hay tres tipos:

- a) Nivel de aislamiento normal. Están dados en función de la tensión máxima de diseño del equipo y se expresan en forma de tablas en las diferentes normas nacionales e internacionales. La selección de un determinado nivel de aislamiento se hace en función de la tensión nominal del sistema y de las condiciones particulares que se pueden presentar en una instalación de acuerdo a la experiencia práctica; como ejemplo instalaciones expuestas a las sobretensiones de origen atmosférico, a la contaminación ambiental puede conducir a una correcta aplicación de las tablas recomendadas por las normas internacionales.
- b) Nivel de aislamiento pleno. Dentro de las posibles condiciones de funcionamiento del neutro de las instalaciones eléctricas, aquellas que requieren nivel de aislamiento pleno o al 100% son las siguientes:  
Sistemas que funcionen con el neutro aislado.  
Sistemas que funcionan con el neutro conectado a tierra a través de bobinas de extinción.  
Sistemas que funcionan con el neutro conectado a tierra a través de resistencias de valor más o menos elevado.  
Estas condiciones influyen sobre los valores del coeficiente de puesta a tierra o factor de conexión a tierra y consecuentemente sobre los valores de la tensión nominal de los aparatos de protección contra las sobretensiones.
- c) Nivel de aislamiento reducido. Para los aparatos o máquinas instaladas en sistemas con neutro rígidamente conectado a tierra, se pueden adoptar niveles de aislamiento reducidos. En los casos que las sobretensiones de origen interno sean menores, se verifica para las sobretensiones por rayo y se pueden emplear descargadores con niveles de operación a las ondas de impulso relativamente más bajas. Por lo general el coeficiente de puesta a tierra de un sistema con neutro sólidamente conectado a tierra es menor que la unidad (se puede suponer un valor del orden de 0,8) para los descargadores se puede suponer una tensión nominal inferior a la del sistema considerado, por lo que se puede obtener sin dificultad un nivel de protección inferior.

#### NIVEL DE PROTECCIÓN.

El problema de la protección de las redes eléctricas contra sobretensiones por rayo y por maniobra de interruptores ofrece un amplio campo de estudio, esto involucra la técnica de la construcción de las máquinas y aparatos eléctricos que deben soportar tensiones elevadas a frecuencia del sistema y por impulsos de acuerdo a valores definidos por las normas.

Evidentemente la selección del nivel de aislamiento es un problema técnico económico ya que el nivel de aislamiento seleccionado debe ser tal que no permita disturbios muy frecuentes durante la operación pero es obvio que no debe corresponder a un costo excesivo. Se debe hacer notar en este punto que la protección no solo debe tener como punto de referencia el costo de la instalación por proteger, también se deben considerar otros factores como es la naturaleza del servicio que prestará la instalación que debe estar incluida en un análisis general.

Se puede afirmar que los niveles de aislamiento previstos para las máquinas garantizan que no sufrirán daños por las sobretensiones de origen interno por rayo y cuyos límites se encuentran contenidos en las normas, pero es también evidente que los valores considerados no pueden ser los máximos posibles.

Para mantener las sobretensiones de origen atmosféricos dentro de límites tolerables es necesario que se instalen dispositivos de protección adecuados coordinando sus características de protección con las de los aislamientos (ver anexo A, para más aclaración).

El concepto de coordinación de aislamiento se basa en la coordinación de los niveles de protección y de aislamiento, en la figura 18 se ilustra este concepto, siendo la curva A la representación del aislamiento de un transformador representada por la curva tensión - tiempo. La curva B representa el nivel de protección en función del tiempo, del dispositivo de protección.

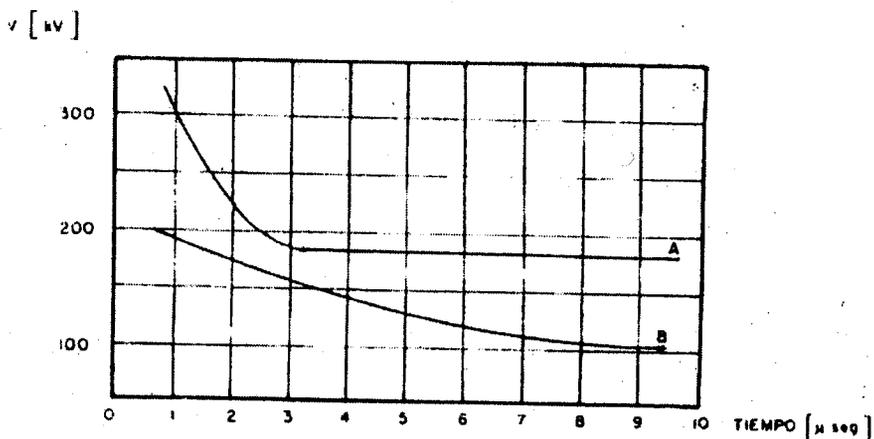


Fig. 18.-

Es evidente que la curva A se encuentra protegida por la curva B, mientras que el margen de seguridad entre las dos curvas debe garantizar la protección de la máquina que debe ser verificada por varias condiciones anormales.

El nivel de aislamiento a impulso representa entonces el valor de la tensión al impulso que el transformador puede soportar sin dañarse, mientras que el nivel de protección esta representado por la máxima tensión que se puede producir a causa de los dispositivos de protección.

En la siguiente figura 19 se ilustra la curva representativa del aislamiento de un transformador y de dos dispositivos de protección coordinada: explosores y descargador de resistencia no-lineal. Se observara que los explosores pueden representar una protección adecuada para tiempos largos ya que para tiempos menores de 2 microsegundos su acción no es suficiente para proteger la maquina.

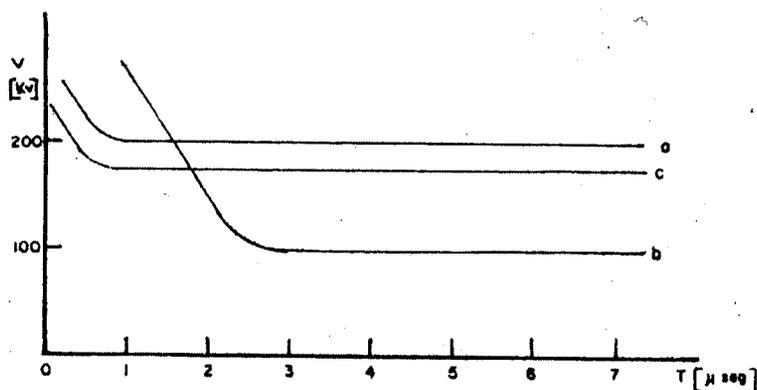


Fig. 19.-

Las curvas representan:

- a) El aislamiento del transformador.
- b) Los explosores.
- c) El descargador a resistencia no-lineal

En términos generales la coordinación de aislamiento se hace tanto en líneas de transmisión como en subestaciones eléctricas.