

**PRINCIPIOS PARA LA COORDINACIÓN DE LOS NIVELES DE AISLACIÓN DE  
APARATOS E INSTALACIONES EN REDES ELÉCTRICAS DE A.T**

**Índice**

1.Introducción .....	2;Error! Marcador no definido.
2.Solicitaciones en Servicio. ....	3
2.1.Generalidades _____	3
2.1.1.Clasificación _____	3
2.1.2.Forma de ondas normalizadas para ensayos _____	4
2.1.3.Reducción y control de las sobretensiones: _____	4
2.2.Tensión normal de servicio. _____	5
2.3.Sobretensiones temporarias _____	6
2.4.Sobretensiones de maniobras _____	6
2.5.Sobretensiones atmosféricas: _____	7
3.Comportamiento de los aislamientos: .....	7
3.1.Generalidades. _____	7
3.2.Características Tensión – Tiempo _____	8
3.2.1.Impulso del tipo atmosférico: _____	9
3.2.2.Impulso del tipo de maniobra: _____	9
3.2.3.Tensión alterna de frecuencia industrial y tensión continua: _____	10
3.2.4.Característica “tensión-tiempo” compuesta: _____	11
3.3.Aislamientos en paralelo – Dispositivos de protección. _____	11
3.4.Niveles de aislación – Normas – Ensayos. _____	12
4.Coordinación de los niveles de aislación: .....	13
4.1.Niveles de aislación normalizados. _____	13
4.2.Enfoques para la coordinación de aislamientos. _____	14
4.3.Procedimiento de coordinación de los aislamientos en AT. _____	14

## **PRINCIPIOS PARA LA COORDINACIÓN DE LOS NIVELES DE AISLACIÓN DE APARATOS E INSTALACIONES EN REDES ELÉCTRICAS DE AT**

### **1. Introducción**

Uno de los aspectos más importantes para el diseño de redes eléctricas de AT y MT es la “coordinación de los aislamientos” o bien los “niveles de aislación”. La importancia del correcto dimensionamiento de una red eléctrica respecto a la coordinación del aislamiento radica en:

- a. Asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica que en cierta forma es una medida de la calidad del servicio, la cual se determina por la duración y frecuencia de las interrupciones por falla de funcionamiento del sistema y sus componentes. Una de las fallas más comunes es la ruptura dieléctrica de los aislamientos de aparatos e instalaciones que integran la red eléctrica.
- b. Considerar el aumento de tensiones nominales de operación del sistema eléctrico, fundamentando en razones técnico – económicas de utilización óptima de materiales y espacio, ante el crecimiento ininterrumpido de la demanda y el necesario transporte de elevados bloques de potencia.

La incidencia de los aislamientos en el costo de un equipo o instalación de AT se hace más notable a mayores tensiones de servicio, de tal modo que tiende a transformarse en uno de los factores económicos limitativos más importante. Por ello es primordial dimensionar los aislamientos de aparatos e instalaciones en la forma más ajustada posible, para lo cual se requiere un cabal conocimiento y sus condiciones de uso.

No resulta sencillo proporcionar una definición clara y precisa, por lo que se citarán definiciones recomendadas por IRAM y la IEC (International Electro technical Commission), respecto de la coordinación de la aislación. En el párrafo C-17 del proyecto de Norma Iram 2211/74 que es una traducción adaptada a la “IEC Publicación 71” de 1967, se define:

**“Coordinación de la aislación”:** conjunto de disposiciones tomadas con el objeto de evitar daños a los aparatos eléctricos debido a las sobretensiones y para localizar las descargas de arco (cuando no se las puede evitar económicamente), en los puntos en los cuales no pueden causar daño. Estos objetivos se logran estableciendo una adecuada correlación entre las condiciones que debe resistir la aislación de aparatos, las sobretensiones a que pueden estar sometidos en servicio y las características de los dispositivos de protección contra sobretensiones”.

La recomendación “IEC Publicación 71-1 de 1976” define: “La coordinación de los aislamientos comprende la selección de los niveles de aislación de aparatos y equipos y su implementación en función de las tensiones que pueden aparecer en la red a que dicho equipos están destinados y tomando en consideración las características de los dispositivos de protección disponibles; todo ello realizado de modo que se reduzca a un nivel aceptable, desde los puntos de vista técnico (de operación) y económico, la probabilidad de que las solicitaciones dieléctricas que los equipos han de soportar deterioren su aislamiento o afecten la continuidad del servicio”.

Se observa que en el problema de la coordinación de los aislamientos confluyen tres aspectos:

- a. Determinar las solicitaciones dieléctricas a que cada aparato o instalación del sistema estará sometido durante su vida útil en servicio, tomando debidamente en cuenta los dispositivos especiales de protección que pudieran modificarlas.
- b. Investigan el comportamiento de los aisladores que integran el sistema frente a las solicitaciones dieléctricas que deberán soportar, teniendo en cuenta las condiciones

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

ambientales o de servicio particulares que pudieran presentarse y que influyen sobre dicho comportamiento.

- c. Definir, en base al conocimiento de las solicitudes y de las características de los aislamientos, los niveles de aislación adecuados para estos últimos, ajustándose al criterio técnico – económico impuesto por el grado de confiabilidad requerido y el riesgo de falla aceptable.

## **2. Solicitaciones en Servicio.**

### **2.1. Generalidades**

#### **2.1.1. Clasificación**

El cuadro de la [figura 1](#) muestra una clasificación sintética de las solicitudes que deben soportar los aislamientos eléctricos durante su vida útil en servicio.

Entre las solicitudes dieléctricas se distinguen dos categorías:

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

A las sobretensiones se las ha clasificado tradicionalmente en dos tipos según su origen, a saber:

- Sobretensiones extremas, provocadas por descargas de origen atmosférico
- Sobretensiones internas, debidas a cambios del estado de funcionamiento del sistema eléctrico (fallas, maniobra de conexión y desconexión de circuitos y aparatos, etc.)

El comportamiento de los aislamientos frente a una sobretensión depende tanto de la magnitud máxima que ésta alcanza como también de la duración o forma de variación en el tiempo, designada como “*forma de onda*” de la sobretensión. Por ello, la clasificación de las sobretensiones en externas e internas resulta insuficiente para una caracterización adecuada de las solicitudes que en servicio debe soportar un aislamiento. Es por ello que actualmente se suelen diferenciar, en base a la *forma de onda* de la tensión en por lo menos cuatro clases:

- 1) Sobretensiones por descargas atmosféricas, cuya duración total no excede de algunas decenas o centenas de microsegundos y que son esencialmente unidireccionales (sin cambios de polaridad), pero presenta amplias variaciones de tensión producidas bruscamente en tiempos del orden de unos pocos microsegundos.
- 2) Sobretensiones de maniobra, cuya duración es de algunos microsegundos, son unidireccionales o con oscilaciones fuertemente amortiguadas, presentando variaciones notables de tensión en tiempos del orden de las décimas de microsegundos.
- 3) Sobretensiones temporarias de frecuencia industrial, duran algunos segundos, excepcionalmente minutos, y son esencialmente oscilatorias con amortiguación reducida y frecuencias del orden de decenas o algunas centenas de Hz.
- 4) Sobretensiones continuas temporarias, que pueden presentarse en sistemas de corriente continua de AT con duración de segundos o excepcionalmente minutos.

Las denominaciones utilizadas para designar las clases de sobretensiones es convencional, no respondiendo necesariamente a consideraciones sobre su origen. Por ello, si bien la mayoría de las sobretensiones originadas por maniobras caen dentro de las “*sobretensiones de maniobra*”, hay

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

ocasiones en que por su forma y duración deben clasificarse en el grupo de “*sobretensiones temporarias a frecuencia industrial*”.

Además de las solicitaciones dieléctricas que se acaban de mencionar, los aislamientos de los aparatos de un sistema eléctrico deben soportar otras que influyen sobre su comportamiento como aislantes eléctricos. A estas solicitaciones se las suele designar “*condiciones de servicio*” e incluyen tanto a fenómenos aleatorios que pueden afectar ciertos aislamientos sólo en forma temporaria (condiciones atmosféricas, contaminación ambiente, etc.) como procesos que pueden modificar la propia naturaleza de los materiales aislantes que lo componen (envejecimiento, calentamiento, etc.)

### 2.1.2. Forma de ondas normalizadas para ensayos

En la práctica los aislamientos son de tal complejidad que no es posible inferir con exactitud su comportamiento con respecto a los distintos tipos de solicitaciones dieléctricas con solo conocer las características y propiedades físicas de los materiales aislantes que los integran. Por ello ineludiblemente deberán recurrirse a pruebas de laboratorio a escala real, ya sea sobre prototipos o sobre los equipos completos, para evaluar con suficiente margen de confianza cual habrá de ser el comportamiento probable de cierto aislamiento en condiciones de utilización prevista.

Los aislamientos se comportan en general de distinta manera frente a solicitaciones que tienen distinta forma de onda, es de suponer que en un laboratorio se deberán poder reproducir dichas solicitaciones. Dado que ello es imposible por la variedad, se utilizan 4 tipos de solicitaciones, siendo cada una de ellas representativa de la clasificación definida. Se tienen:

- 1) **Impulsos de tensión del tipo atmosférico.**
- 2) **Impulsos de tensión del tipo maniobra.**
- 3) **Tensiones alternas de frecuencia industrial.**
- 4) **Tensiones continuas.**

Respecto a los 2 últimos tipos, se trata del tipo de tensiones consideradas básicas en los sistemas eléctricos. En cambio, para los 2 tipos de impulsos indicados, se requiere una especificación de las formas de onda, de manera de normalizar los ensayos en los distintos laboratorios. De esta forma se han establecido normas nacionales e internacionales que fijan las formas de onda de los impulsos de tensión de ensayo.

Las [figuras 2](#) y [3](#) muestran respectivamente los parámetros que la “IEC Publicación 60” considera para la definición de la forma de onda de los impulsos atmosféricos y de maniobra. Los primeros se designan convencionalmente como 1,2/50  $\mu\text{s}$  (1,2  $\mu\text{s}$  como tiempo convencional de frente y 50  $\mu\text{s}$ , como tiempo convencional de cola). Para los impulsos de maniobra se puede utilizar la forma 250/2500  $\mu\text{s}$  (250  $\mu\text{s}$  como tiempo convencional de cresta y 2500  $\mu\text{s}$  como tiempo convencional de cola). En la [figura 4](#) se comparan las escalas de las solicitaciones.

### 2.1.3. Reducción y control de las sobretensiones:

Los medios de control o reducción de sobretensiones, implican en general cierto costo suplementario de la instalación, el que debe ser compensado con ventaja por el ahorro del aislamiento que las menores sobretensiones permitan, pues de otra manera tales medidas no serían económicamente justificable. Este balance técnico-económico define la solución más adecuada en cada caso.

Se pueden aplicar 3 clases de medios aplicados al control o reducción de las sobretensiones y de sus efectos a saber:

- a. Medidas que actúan directa o indirectamente sobre el mecanismo de generación de las

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

- sobretensiones, reducen la severidad de estas, modificando su forma y magnitud desde la fuente. Por ejemplo: Resistencias de pre – inserción o de desconexión de los disyuntores.
- b. Dispositivos que colocados en ciertos lugares de la instalación actúan en el momento en que se hace presente una sobretensión de cierto tipo y magnitud, reduciendo con su acción, la severidad de la misma. De este modo los aislamientos que se encuentran dentro de la zona de influencia del dispositivo, se encuentran protegidos por este y deben soportar sobretensiones menores. Por ejemplo: explosores y descargadores de sobretensiones de tipo auto válvula.
  - c. Medidas tendientes a disminuir la duración de las interrupciones en servicio cuando se producen inevitables fallas del aislamiento, de modo tal que la continuidad del servicio se vea afectada por lo menos posible. Por ejemplo: recierre rápido monofásico o trifásico.

## 2.2. Tensión normal de servicio.

Para el aislamiento de un aparato, la tensión normal de servicio representa una sollicitación dieléctrica sostenida, de características y magnitud relativamente constantes y bien determinada (nunca será mayor que la tensión máxima de servicio prevista para el sistema en el cual se ha instalado el aparato). Es esta sollicitación la que se encuentra siempre presente envejeciendo los materiales aislantes, atacando los mismos (contaminación externa por condiciones ambientales). Es por ello que constituye el parámetro principal para el diseño de los aislamientos.

La “IEC Publicación 71-1/1976” indica en lo concerniente a la tensión de servicio normal que “el aislamiento debe poder soportar en forma permanente la máxima tensión del equipamiento para el cual ha sido diseñado”. Esto a su vez requiere se estudien:

- a. Condiciones de contaminación a que se encuentran sometidos los aislantes.
- b. Envejecimiento o deterioro progresivo que pueden sufrir los aislantes por descargas parciales o inestabilidad térmica provocada por las sollicitaciones dieléctricas.

Se indican tres valores característicos para describir las sollicitaciones dieléctricas normales en una red eléctrica (IEC Publicación 71-1, artículos 3,4 y 5):

- 1) Tensión nominal del sistema, es el valor eficaz de la tensión entre fases con la que se designa la red.
- 2) Tensión máxima del sistema es el valor eficaz de la máxima tensión entre fases que puede aparecer en cualquier punto de la red y en cualquier instante bajo condiciones normales de servicio.
- 3) Tensión máxima del equipamiento, es el valor eficaz de la máxima tensión entre fases para la cual se especifica el equipamiento de la red y sus instalaciones en lo referente al aislamiento.

Es a la máxima tensión del equipamiento ( $U_m$ ) a que se ha de referir todas las sollicitaciones dieléctricas que aquel debe soportar.

Para estudios de coordinación de los aislamientos, las diversas sollicitaciones dieléctricas suelen caracterizarse por su valor de cresta de tensión, expresándose como  $\frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{3}} = 0,816 U_m = \hat{U}$

Además se expresa el factor de sobretensión como:  $f_s = \frac{\hat{U}_p}{\hat{U}}$ ,  $\hat{U}_p$ : *valor de cresta particular*

### 2.3. Sobretensiones temporarias

Las sobretensiones internas a las que conviene dividir las en temporarias y de maniobras, son siempre originadas por cambios bruscos o intempestivos de la configuración del sistema. Dichos cambios llevan el estado eléctrico del sistema (distribución de corrientes y tensiones) de un régimen estacionario a otro, pasando por un estado transitorio que en una primera fase, suele presentar bruscos cambios de tensión de considerable magnitud (sobretensiones de maniobras), que se amortiguan rápidamente para dar paso luego a una fase de estado cuasi – estacionario, durante el cual la amplitud de la tensión varía lentamente hasta llegar al estado estacionario final. Cuando la tensión de la fase cuasi – estacionaria, excede la máxima tensión de servicio prevista se la llama sobretensión temporaria o a veces dinámica. En sistemas trifásicos AT y MAT, las sobretensiones temporarias son originadas por:

- Efecto Ferranti.
- Desconexión brusca de la carga al extremo de una línea de gran longitud.
- Fallas monofásicas a tierra.
- Auto excitación de alternadores por desconexión brusca de carga inductiva o conexión de carga capacitiva.
- Resonancia y ferro resonancia (características no lineales de magnetización)

### 2.4. Sobretensiones de maniobras

Las sobretensiones de maniobra son aquellas que pueden aparecer entre fases o entre fase a tierra y el cambio de configuración de la red o maniobra que las origina, puede en realidad deberse a causas diversas, tales como maniobras de conexión o desconexión de circuitos y aparatos, aparición de fallas o cortocircuitos, variaciones bruscas de carga, etc.

Así pues las sobretensiones de maniobra, pueden presentar una gran variedad de magnitudes y formas de onda. En general su evaluación o calculo exacto es bastante complicado, no solamente por la gran cantidad y variedad de parámetros que intervienen, sino también porque muchos de ellos, son a menudo, totalmente desconocidos o se los conoce con muy poca precisión. Además hay parámetros relacionados con magnitudes que son esencialmente aleatorias. Finalmente varias maniobras pueden producirse dentro de un intervalo de tiempo tan pequeño, que hay una superposición e interacción de los diferentes procesos transitorios a que dan lugar. Es por esto que las herramientas de calculo utilizadas se basan siempre en técnicas de simulación con modelos, matemáticos o físicos y que la información obtenida suele darse en forma de curvas de distribución de probabilidades, cuya determinación es muy onerosa.

Los parámetros que determinan o influyen sobre la naturaleza de un proceso transitorio que da lugar a la aparición de sobretensiones de maniobra, son numerosos y sus relaciones muy complejas, pero pueden distinguirse dos clases de parámetros:

- Los que caracterizan el circuito y sus componentes antes y después de la maniobra (cambio de configuración).
- Los que identifican el tipo, la forma y momento de la ejecución de la maniobra (características del interruptor, cortocircuito, etc., que ocasiono el cambio de configuración).

Las sobretensiones de maniobra más importantes suelen ser originadas por:

- a. Energización y re energización de líneas largas.
- b. Aparición o supresión brusca de fallas.

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

- c. Interrupción de grandes corrientes capacitivas.
- d. Interrupción de pequeñas corrientes inductivas.
- e. Desconexión brusca de carga al extremo de una línea de transmisión larga.

## 2.5. Sobretensiones atmosféricas:

Las sobretensiones de origen atmosférico (sobretensiones atmosféricas), son ocasionadas por la actividad eléctrica natural de la atmósfera que se manifiesta en descargas (rayos) que pueden afectar tanto a las instalaciones de una red eléctrica, que se encuentran directamente expuestas a ellas (líneas aéreas), como a aquellas que están próximas a las expuestas (subestaciones transformadoras).

Sobre la frecuencia de aparición, forma y magnitud de las sobretensiones atmosféricas, influyen:

- Las características propias de la actividad atmosférica y de las descargas a tierra en la ubicación geográfica de la instalación que se analiza.
- Las particularidades constructivas de esta (geometría de las líneas aéreas, presencia de conductores de guardia, etc.).
- La configuración del sistema que ella integra (nº de líneas conectadas una E.T., distancias entre aparatos, etc.).

Se suelen distinguir 3 tipos de sobretensiones, según el modo en que son generadas por una descarga atmosférica:

- a. Sobretensiones atmosféricas producidas por descarga directa sobre los conductores de fase de una línea aérea.
- b. Sobretensiones producidas por contorneo inverso del aislamiento como consecuencia de descargas atmosféricas sobre los conductores de guardia o las torres de una línea aérea.
- c. Sobretensiones inducidas en los conductores de una línea aérea cuando se producen descargas atmosféricas a tierra en las proximidades de la misma.

## 3. Comportamiento de los Aislamientos:

### 3.1. Generalidades.

Se suele designar a los aislamientos de acuerdo a su ubicación en las condiciones de servicio, según la siguiente clasificación:

- aislaciones externas      { para interiores  
  { para exteriores
- aislaciones internas

Definiciones adecuadas se pueden encontrar en la norma IRAM 2211, artículos C-6 al C-9.

En la IEC Publicación 71-1, artículos 10 y 11, se ha introducido una clasificación de los aislamientos según su comportamiento natural luego de sufrir una ruptura dieléctrica causada por una sollicitación dieléctrica excesiva.

Distinguiremos así entre:

- a. Aislamientos auto regenerativos, que luego de una descarga disruptiva, recuperan

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

completamente sus propiedades aislantes.

- b. Aislamientos no – auto regenerativos, que no logran por si mismo recuperar sus propiedades dieléctricas, luego de una descarga disruptiva.

Desde el punto de vista del diseño de un aislamiento, interesa saber si este puede soportar cierta sollicitación sin sufrir ruptura dieléctrica. Es pues necesario establecer para un aislamiento determinado, la máxima tensión soportable frente a una sollicitación de forma de onda y duración especificadas.

En principio este parámetro indicaría que cualquier sollicitación del tipo especificado cuya magnitud exceda la máxima tensión soportable provocaría siempre la ruptura dieléctrica del aislamiento, mientras que si la magnitud de la sollicitación es menor o igual que la máxima tensión soportable, nunca habría ruptura dieléctrica.

Sin embargo, como en el proceso de las descargas eléctricas, intervienen fenómenos aleatorios, es evidente que no se puede tener total certeza sobre el comportamiento del aislamiento, de modo que la máxima tensión soportable tendrá también carácter aleatorio. Es decir, si se determina experimentalmente la máxima tensión soportada o resistida por cada uno de una serie de especímenes idénticos de un aislamiento dado frente a cierto tipo de sollicitación, encontraremos que no es exactamente igual para todos ellos. La mejor manera de describir el comportamiento del aislamiento estudiado es por medio de la función estadística de distribución de las máximas tensiones soportadas que se determinan experimentalmente.

Surge así la posibilidad de definir una tensión soportable estadística que sería el valor de cresta o magnitud de la sollicitación de forma dada, para la cual la probabilidad de que se produzca una descarga disruptiva es igual a cierta probabilidad de referencia prefijada. En la IEC-71, artículo 26, se ha elegido una probabilidad de referencia igual a 90%.

En el caso de aislamientos auto regenerativos, es fácil realizar una serie de pruebas ensayos que provean la información necesaria para determinar la tensión soportable estadística, con un grado suficiente de precisión, ya que un solo espécimen del tipo del aislamiento en estudio, puede ser utilizado repetidas veces en los ensayos, aunque se produzcan descargas disruptivas.

Cuando se trata de aislamiento no – auto regenerativos, haría falta ensayar un gran numero de especímenes, que luego de una descarga disruptiva quedarían inutilizados. Determinar de este modo la tensión estadística soportable sería excesivamente costoso. Es por eso que en la practica se especifica para los aislamientos no – auto regenerativos, una tensión soportable convencional que la IEC 71, artículo 27, define como *el valor de cresta o magnitud de una sollicitación de forma dada que el aislamiento ha de soportar cierto numero de veces en el curso de un ensayo sin que se produzca ninguna descarga disruptiva (y sin evidenciar deterioro del aislante).*

Evidentemente, si se establece cierta “tensión soportable convencional” para su aislamiento mediante un ensayo, no quiere decir en absoluto que esta se la máxima sollicitud soportable, pero se puede inferir un cambio con cierto grado de confianza, que sollicitaciones menores que la o las de ensayo serian soportadas sin inconvenientes.

### **3.2. Características Tensión – Tiempo**

Para efectuar una correcta coordinación de los aislamientos de una red, es usual caracterizar a estos por medio de curvas “*tensión-tiempo*”, que dan una información sintética de su comportamiento frente a las sollicitaciones ordinarias y excepcionales a que pueden estar sometidas en condiciones normales de servicio.

Interesa saber para un aislamiento dado, que sollicitación dieléctrica puede soportar sin que se

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

produzca su “ruptura dieléctrica”. Se entiende por ruptura dieléctrica al proceso que sufren el o los dieléctricos que integran un aislamiento cuando debido a la aplicación de una sollicitación dieléctrica excesiva se producen deterioros de tal naturaleza que sus propiedades aislantes quedan anuladas. En el proceso de ruptura dieléctrica intervienen diversas características de la sollicitación que la provoca, principalmente:

- Magnitud y polaridad de la tensión aplicada
- Duración o forma de onda
- Número de sollicitaciones reiteradas y frecuencia de repetición

En consecuencia, la curva tensión-tiempo de un aislamiento depende en principio, no solo de las propiedades intrínsecas de este, sino también del tipo de sollicitación aplicada.

### 3.2.1. Impulso del tipo atmosférico:

La [figura 5](#) ilustra la característica tensión-tiempo con tensión de impulso del tipo atmosférico.

Supongamos que a un dispositivo con aislamiento gaseoso le aplicamos sucesivos impulsos de tensión de igual forma de onda pero de magnitud creciente. La magnitud de cada uno de ellos podrá caracterizarse por su valor instantáneo máximo o de cresta  $\hat{U}$ , el cual se produce en  $t = T_{cr}$ , considerando como origen  $t = 0$  el instante en que se inicia el impulso de tensión.

Se observa así que para valores  $\hat{U} < \hat{U}_0$  no se producen rupturas dieléctricas, siendo  $\hat{U}_0$  la tensión disruptiva de dicho aislamiento para la forma de onda especificada. Si  $\hat{U} > \hat{U}_0$ , se tienen descargas disruptivas que se manifiestan por un colapso de tensión sobre la cola de onda ( $\hat{U}$  no mucho mayor que  $\hat{U}_0$  y  $t_r > T_{cr}$ ) y en otras ocasiones sobre el frente de la misma (cuando  $\hat{U} \gg \hat{U}_0$  y  $t_r < T_{cr}$ ).

Cuando la ruptura es sobre la cola de la onda, para definir los puntos de la característica tensión-tiempo, conviene considerar los tiempos a la ruptura  $t_r$  contados a partir de  $t = 0$  y los correspondientes valores de tensión de cresta del impulso  $\hat{U}$ , ya que esta magnitud indica el máximo valor instantáneo de sollicitación que ha soportado el aislamiento antes de la ruptura. Por otra parte, cuando la ruptura es sobre el frente de la onda, deben elegirse como puntos de la característica tensión – tiempo, las determinadas por  $t_r$  y la tensión  $U_r < \hat{U}$  alcanzada en el momento de producirse la ruptura, ya que con respecto al proceso de esta o al evaluar la tensión instantánea máxima realmente soportada por el aislamiento no tienen ninguna relevancia los valores que la sollicitación hubiera alcanzado para tiempos  $t > t_r$ .

Finalmente, la característica tensión – tiempo trazada estará compuesta por dos zonas, tal como se muestra en la [figura 6](#). En  $t = T_{cr}$ , el límite entre ambas zonas, la curva representativa de la caracterización tensión-tiempo, presentara una ligera inflexión.

Lo que en realidad se obtiene luego de una serie de ensayos, es una nube de puntos en el plano ( $\hat{U}$ ,  $t_r$ ) que permiten definir una franja cuya tendencia general es la mostrada en la [figura 6](#). La disposición de los puntos dentro de una franja se debe a las variaciones aleatorias de las condiciones de ensayo y a las implícitas en el propio proceso de la ruptura dieléctrica.

### 3.2.2. Impulso del tipo de maniobra:

Para tensiones de impulso del tipo de maniobra el comportamiento de un aislante auto regenerativo,

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

especialmente de espacios en aire, es muy diferente al que se acaba de analizar para los impulsos del tipo atmosférico.

Los tiempos de frente y de cola de los impulsos de maniobra son mucho mayores que lo de los atmosféricos, lo que implica que para tiempos cercanos a  $T_{cr}$ , la tensión varía mucho más lentamente, esto es, valores de tensión cercanos al de cresta se mantienen sobre el aislamiento tiempo suficiente como para dar lugar a la formación de la descarga disruptiva completa, si es que se ha excedido el límite de la tensión crítica correspondiente a la forma de onda utilizada. En consecuencia, aun para tensiones de cresta que son levemente superior a la tensión crítica, la ruptura dieléctrica se produce casi siempre sobre la cresta de la onda o sobre su frente, pero en la mayoría de los casos prácticos próxima a la cresta. Por otra parte, se puede comprobar que la tensión de cresta crítica  $\hat{U}_0$  varía con la forma de onda de impulso aplicada, en particular en función del tiempo a la cresta  $T_{cr}$ .

Se ve entonces que el comportamiento de un aislamiento a solicitaciones del tipo de los impulsos de maniobra, se podrá caracterizar a los fines prácticos por medio de una curva “tensión disruptiva crítica – tiempo a la cresta” ( $\hat{U}_0$  vs.  $T_{cr}$ ), como muestra la [figura 7](#). Una característica  $\hat{U}_0 - T_{cr}$  es una simplificación ya que no se ha tenido en cuenta el carácter aleatorio implícito en el proceso de la ruptura dieléctrica.

Una particularidad de los aislamientos auto regenerativos frente a los impulsos del tipo de maniobra es que su característica tensión-tiempo suele presentar un mínimo tal como se observa en la [figura 7](#).

### 3.2.3. Tensión alterna de frecuencia industrial y tensión continua:

Para estudiar como se comporta un aislamiento sometido a una tensión continua o alterna de frecuencia industrial, se la puede aplicar una tensión del tipo elegido partiendo de una amplitud cero, incrementándola luego en forma rápida y regular hasta alcanzar en unos pocos segundos cierto valor previamente especificado y manteniéndola finalmente con esta amplitud hasta que se produzca una descarga disruptiva.

Es intuitivamente lógico, pensar que cuanto mayor sea la amplitud  $\hat{U}_f$ , de una tensión de frecuencia  $f$  aplicada en forma sostenida, menor será el tiempo  $t_a$  que transcurre desde el momento en que se inició una aplicación y el de la ruptura dieléctrica, si esta se produce.

Así pues, una curva “tensión – tiempo” de  $\hat{U}_f$  vs.  $t_a$ , ofrecerá una adecuada caracterización del aislamiento sometido a este tipo de solicitud ([figura 8](#)).

Para las aplicaciones prácticas sería conveniente conocer la característica “tensión-tiempo” del aislamiento considerado durante toda la vida útil del mismo (hasta 20 o 30 años), pero esto es prácticamente imposible de conseguir por razones económicas y de tiempo. Se puede sin embargo estimar la tendencia general partiendo de pruebas realizadas en tiempos que duran algunos minutos o a lo mucho horas, lo cual se considera suficiente.

El proceso que lleva a la ruptura dieléctrica puede originarse en fenómenos de muy diversa naturaleza, como ser:

- puramente eléctricos (ionización debido al campo eléctrico en el seno del material aislante)
- electroquímicos (progreso deterioro químico del material)
- electrotérmicos (calentamiento por pérdidas dieléctricas)

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

Influyen además en el desarrollo de estos procesos factores tanto internos (propiedades y calidad de los materiales aislantes), como externos (temperatura ambiente, contaminación, etc.)

En este caso también la característica tensión-tiempo no es una curva nítida sino una franja más o menos difusa.

#### 3.2.4. Característica “tensión-tiempo” compuesta:

La [figura 9](#) que ejemplifica una “característica tensión – tiempo compuesta”, o sea superpuestas las características tensión-tiempo-particulares.

Necesariamente como los tiempos de interés pueden ser del orden de los microsegundos (impulsos atmosféricos) a millones de segundos (frecuencia industrial) la escala de tiempos ha debido graduarse en forma logarítmica.

### 3.3. Aislamientos en paralelo – Dispositivos de protección.

El conocimiento de las características tensión-tiempo de los aislamientos de los distintos aparatos que integran una instalación AT, es necesaria para poder evaluar el comportamiento de la instalación en conjunto frente a los diferentes tipos de solicitaciones eléctricas a que esta sometida.

El caso mas simple es aquel en que dos aparatos están conectados en paralelo a un punto de la instalación donde aparecen las solicitaciones eléctricas que se analizan, de modo que ambos reciben simultáneamente igual solicitación.

Según sea la forma de onda de la solicitación (atmosférica, de maniobra o de frecuencia industrial), habrá que elegir las características tensión-tiempo correspondientes, para ambos aislamiento y representarlas gráficamente sobre un mismo sistema de coordenadas. En la [figura 10](#) las curvas A y B representan sendas características tensión-tiempo, comparando estas curvas surgen las siguientes observaciones:

- a. Si el valor  $U$  de la solicitación resulta mayor que  $U_p$ , el aislamiento correspondiente a la curva B, sufrirá una descarga disruptiva antes que el A. Mas aún, como al producirse la descarga en B la tensión sufre un “colapso” en el punto en que A y B están conectados, entonces el aislamiento A no es sometido a solicitación alguna y en consecuencia en A no habrá descarga disruptiva.
- b. Si  $U < U_p$ , sucede todo lo contrario, el aislamiento A es el que puede presentar descarga disruptiva.
- c. Cuando  $U = U_p$ , la probabilidad de las descargas disruptivas, se repartirá entre A y B, es igualmente probable que sea A ó B, el primero de los aislamientos en presentar una descarga disruptiva y cuando esta suceda el otro no lo sufrirá.

El análisis hecho tiene una aplicación en el concepto de protección de un aislamiento. Si el aislamiento A es auto regenerativo (un explosor de puntas) y el B es no-auto regenerativo (un transformador), vemos que el A protege al B de toda solicitación cuya magnitud sea inferior a  $U_p$ , tensión que llamaríamos “máxima tensión de protección efectiva” de A (dispositivo protector) con respecto a B (aislamiento a proteger)

Además cuando se trata de solicitaciones impulsivas (atmosféricas o de maniobras) y es  $t_p < T_{cr}$ , el dispositivo protector A actuara eficazmente protegiendo al aislamiento B en presencia de ciertas solicitaciones de la forma de onda especificada que, aunque pudieran potencialmente alcanzar magnitudes mayores que  $U_p$ , presentan en el frente de la onda una velocidad media de crecimiento de la tensión inferior a  $U_p / t_p$  (pendiente de la recta de trazos que pasa por el origen en la [figura 10](#)).

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

Para que un dispositivo protector sea eficaz frente a cualquier sollicitación, su curva característica tensión – tiempo deben quedar a la izquierda de la del aislamiento a proteger. Cuando ello no sucede como en la [figura 10](#), deberá asegurarse que sollicitaciones mayores que  $U_p$  (o cuya velocidad de crecimiento de la tensión en el frente de la onda sea superior a  $U_p / t_{rp}$ ), no habrán de presentarse en el punto de la instalación considerada. En base a este principio, se eligen en la práctica todos los dispositivos de protección contra sobretensiones en las instalaciones de AT.

### 3.4. Niveles de aislación – Normas – Ensayos.

A continuación se analiza como se determinan las características tensión-tiempo:

La complejidad de las estructuras aislantes en aplicaciones técnicas y la de los mismos procesos que intervienen en la ruptura dieléctrica hacen imposible una estimación de las características tensión-tiempo por medio de cálculos y en base solamente al conocimiento de las leyes teóricas de comportamiento de los distintos materiales involucrados. Solo es practicable una determinación empírica a través de ensayos sistemáticos realizados en laboratorio, ya sea sobre los mismos aparatos cuyos aislamientos se quiere comprobar o sobre modelos y prototipos.

Aun en el caso en el que se dispone de las instalaciones de laboratorio adecuadas, definir completamente las características tensión – tiempo de todos los aislamientos utilizados en la práctica en el rango de los  $\mu s$  a los millones de segundos es absolutamente imposible por la incalculable cantidad de tiempo que sería necesario utilizar para ello.

Es por estas razones que para las aplicaciones técnicas es necesario limitar la cantidad de pruebas de laboratorio al mínimo suficiente como para definir los puntos o tramos fundamentales de las curvas tensión-tiempo, infiriéndose luego el comportamiento general del aislamiento a partir de ese numero limitado de resultados, completados por la experiencia anterior de casos similares y el conocimiento teórico y empírico de las propiedades de los materiales que integran el aislamiento y de su aplicación particular en el aparato estudiado.

Así pues, un aislamiento técnico suele especificarse refiriéndose solamente a dos o tres “niveles de aislación”, los que deberá superar para considerárselo apto en la aplicación prevista:

- el nivel de aislación a frecuencia industrial de corta duración (50 Hz, 1 minuto)
- el nivel de aislación a impulsos atmosféricos (1,2/50  $\mu s$ )
- el nivel de aislación a impulsos de maniobra (250/2500  $\mu s$ )

La aptitud del aislamiento para soportar cierto nivel de tensión de cada tipo se comprueba mediante un ensayo de laboratorio durante el cual se lo somete a una sollicitación de valor especificado en condiciones determinadas.

Estas pruebas de laboratorio, se consideran satisfactorias si el aislamiento no evidencia ningún deterioro de sus propiedades aislantes. Para cada tipo de ensayo, el valor de la sollicitación aplicada al aislamiento y soportada satisfactoriamente por este define su nivel de aislación a ese tipo de sollicitación.

Generalmente además de los niveles de aislación del aislamiento se especifican condiciones especiales de utilización: esfuerzos mecánicos que debe soportar, condiciones atmosféricas (hielo, lluvia, contaminación, etc.), temperatura máxima de funcionamiento, etc. En tal caso, también deberá comprobarse su aptitud para soportar correctamente las condiciones previstas y en consecuencia, se realizaran pruebas especiales para ello en el laboratorio.

Es necesario especificar muy bien las condiciones en que se deben realizar los ensayos, tolerancias

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

admitidas en las formas de onda de las tensiones de ensayo, precisión de las mediciones, temperatura y presión ambiente, etc.

Por ello, surge la necesidad de establecer normas de ensayo. Estas normas se fijan en base a la experiencia empírica y al conocimiento general disponible sobre la tecnología ampliamente conocida y que orienta la fabricación y aplicación de la mayoría de los equipos e instalaciones usuales. Con relación a los aislamientos para instalaciones y equipos de redes de AT, las principales normas IRAM y recomendaciones IEC en uso son:

IRAM 2211: "Coordinación de la aislación eléctrica" Octubre de 1972.

I.E.C. 38: "I.E.C. Standard Voltajes" (5º edición - 1975)

I.E.C. 71-1: "Insulation co-ordination – Part. 1: Terms, definitions, principles and rules" (6º Edición – 1976)

I.E.C. 71-2: "Insulation co-ordination – Part. 2: Application Guide" (2º Edición – 1976)

#### **4. Coordinación de los niveles de aislación:**

Parecería que siendo las tensiones normales de servicio solicitudes dieléctricas de menor magnitud que las sobretensiones, han de ser estas últimas, los factores predominantes a considerar para el diseño de los aislamientos. Sin embargo, las sobretensiones solo se presentan ocasionalmente y son de muy corta duración, resultando así que en la mayoría de los casos, lo más conveniente es adoptar medidas especiales para controlarlas y reducir las de modo que no actúen directamente sobre los aislamientos principales, mientras que estos últimos se dimensionan fundamentalmente en base a las tensiones normales de servicio, que son las solicitudes realmente inevitables y que están presente durante toda la vida útil del aislamiento.

Dentro de esta filosofía general de diseño, una evaluación técnico-económica será siempre la que defina el dimensionamiento final. La implementación de los medios técnicos, que se adoptan para controlar o reducir las sobretensiones, deberán ocasionar un gasto inferior al ahorro que sobre el diseño del aislamiento principal posibilita la correspondiente reducción de las solicitudes.

El primer factor a considerar en el diseño de los aislamientos, debe ser la tensión nominal de servicio, ajustando este diseño desde un punto de vista técnico-económico, teniendo en cuenta la magnitud y clase de las sobretensiones que se esperan, su probable frecuencia de repetición, los medios para controlarlas o limitarlas y el riesgo de falla de aislación compatible con la confiabilidad requerible del sistema. La coordinación debe realizarse en dos sentidos:

- a. seleccionar para cada equipo el aislamiento adecuado para soportar las solicitudes previstas
- b. coordinar los niveles de aislación de los equipos entre si y con los dispositivos de protección, de modo de minimizar el costo para un riesgo de falla determinado

#### **4.1. Niveles de aislación normalizados.**

Para una aplicación dada, un aislamiento suele especificarse refiriéndose solamente a los tres niveles de aislación indicados en el punto 3.4.

La aptitud del aislamiento para soportar cierto nivel de tensión de cada tipo se comprueba mediante un ensayo de laboratorio, durante el cual se lo somete a una solicitud de valor especificado en condiciones determinadas. Para cada tipo de ensayo, el valor de la solicitud aplicada al aislamiento y soportada satisfactoriamente por este define su nivel de aislación a ese tipo de solicitud y en las condiciones especificadas.

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

El nivel de aislación a impulsos atmosféricos (1,2 / 50) se denomina “nivel básico de aislación” (NBA ó BIL: basic insulation level). Sería mas correcto referirse al nivel de impulsos de maniobra soportadas por la aislación.

El nivel de aislación a impulsos de maniobra (250/2500), puede identificarse como NAIM ó SIL (switching insulation level ). Una denominación más acertada sería la de nivel de impulso de maniobra soportada.

El factor dimensionante primordial de un aislamiento es la tensión de servicio, por lo cual no es extraño que para cada tensión de servicio, las variaciones posibles en el diseño de un aislamiento son marginales, ligadas a la mayor o menor proporción de sobretensiones a soportar. Para cada tensión de servicio, los niveles de aislación que pueden requerir los distintos equipos varían dentro de límites reducidos. Por ejemplo, para una red de tensión máxima de servicio de 145 KV, el aislamiento puede tener un NBA entre 450 a 650 KV.

El cuadro de la [figura 11](#) muestran los niveles de aislación indicados por la norma IRAM 2211 y el de la [figura 12](#), los correspondientes a la norma IEC 71, correspondientes a tensiones de servicio máximas, superior a 300 KV.

La coordinación de los aislamientos consistirá entonces en la selección ordenada, de entre los niveles de aislación normalizados, de aquellos que conviene especificar para los distintos equipos de modo de obtener la seguridad de servicio deseada al menor costo posible.

#### **4.2. Enfoques para la coordinación de aislamientos.**

El cuadro de la [figura 13](#) enuncia en forma sintética, los principales aspectos que debe considerarse para la evaluación técnica de alternativas de coordinación.

La presencia de diversos tipos de solicitaciones, distintas clases de aislantes y diferentes criterios de evaluación técnica, dan lugar al problema de coordinación de aislación, características complejas.

En la [figura 14](#) se muestra que las sobretensiones atmosféricas son dominantes para tensiones de servicio inferiores a 400 KV. Para niveles de tensiones superiores, adquieren importancia las de maniobra, si se consideran para estas una magnitud máxima de 2,5 pu.

Por ello conviene adoptar medios para reducir las sobretensiones de maniobra en los sistemas de MAT a valores inferiores a 2 pu. Las distancias disruptivas críticas en aire para las ondas de impulso del tipo maniobra crecen en forma proporcional a la tensión de cresta del impulso elevado a una potencia mayor que 1 ([figura 15](#)), mientras que esto no sucede para los impulsos atmosféricos. Esto significa que se requieren cada vez mayores inversiones marginales para soportar, a mayores tensiones de servicio, una magnitud constante en valores de pu de sobretensiones de maniobra. Dicho efecto es extremadamente importante a tensiones nominales superiores a 700 KV ([figura 16](#)).

Es entonces plenamente justificado utilizar dispositivos de control y reducción de las sobre tensiones de maniobra hasta niveles próximos a 1,5 pu.

Al adoptar estas medidas, se llega a valores próximos a los de máxima sobretensiones temporarias a frecuencia industrial, las cuales condicionan a su vez la aplicación de los dispositivos de protección contra sobre tensiones, tales como descargadores.

#### **4.3. Procedimiento de coordinación de los aislamientos en AT.**

Los aislamientos se pueden clasificar en auto regenerativos y no – auto regenerativos. Entre los primeros podemos citar las cadenas de aisladores de líneas aéreas o el aislamiento de un

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

seccionador. A la segunda categoría pertenece el aislamiento interno de un transformador.

Debido a la manera distinta en que estos dos tipos de aislamientos se comportan, resulta necesario proteger a los no-auto regenerativos de las excesivas sobretensiones (mediante descargadores), mientras que los auto regenerativos, son generalmente aislamientos no protegidos.

En la [figura 17](#) se ha esquematizado la secuencia lógica de desarrollo de los momentos que constituyen el procedimiento de la coordinación, destacándose el tratamiento diferente dado a los aislamientos auto regenerativos y a los no-auto regenerativos.

El punto de partida del dimensionamiento es la tensión de servicio (bloque 1) del sistema y las características estructurales y operativas de la red (bloque 2). Con estos datos iniciales se calculan las sobre tensiones temporarias previstas, se selecciona un nivel de aislación general para todos los equipos, ya sea que tenga aislamiento auto regenerativo o no (bloque 5). Se elige a continuación los descargadores de sobretensión (bloque 6), cuya tensión nominal debe ser ligeramente superior a las máximas sobretensiones temporarias. Elegidos los descargadores de sobretensiones se los distribuye de modo tal de proteger adecuadamente todos los aislamientos no-auto regenerativos. Se fija luego el nivel de protección conseguido, es decir, la magnitud a que quedan reducidas las máximas sobretensiones de origen atmosférico por el efecto limitador de los descargadores y en función de este se ajustan los aislamientos no-auto regenerativos (bloque 7), eligiendo un NBA ligeramente superior al nivel de protección asegurado por el descargador ( $f_s = 1,25$ ).

Corresponde finalmente verificar el nivel de protección que pueden asegurar los descargadores elegidos con respecto a las sobre tensiones de maniobra y definir en consecuencia el NAIM para los aislamientos no – auto regenerativos (línea de trazos del bloque 4 al 7).

Si los aislamientos no – auto regenerativos así definidos resultasen excesivamente onerosos, se intentara modificar la concepción estructural de la red o sus condiciones operativas de modo que se reduzcan las sobretensiones temporarias (línea de trazo del bloque 7 al 2). Esta reducción permitirá elegir descargadores de menor tensión nominal y por consiguiente, con menores niveles de protección, lo que a su vez posibilita una reducción de los niveles de aislación de los aislamientos no-auto regenerativos. Este procedimiento de aproximaciones sucesivas se continúa hasta lograr niveles de aislación técnicamente adecuados y económicamente aceptables.

Se procede luego a ajustar los aislamientos auto regenerativos (bloque 8), fijando para ello un NAIM superior al valor de las máximas sobre tensiones de maniobra que se pueden esperar (bloque 4), debidamente corregidas luego de las modificaciones que pueden haberse introducido a la red durante el proceso de selección de los aislamientos no-auto regenerativos. El factor de seguridad a utilizar varía de 1,15 a 1,25.

Si los aislamientos auto regenerativos parecieran ser demasiado caros, se deberán considerar medidas adecuadas de control de las sobretensiones de maniobra modificando convenientemente las características de la red (línea de trazos del bloque 8 al 2) y en función de estas modificaciones recalcular las sobre tensiones máximas (bloque 4) y reajustar los aislamientos (bloque 8). Deberá tenerse también en cuenta el posible efecto reductor de las sobretensiones de maniobra que en algunos casos pueden soportar los descargadores (línea de trazos del bloque 6 al 8).

Luego de determinar las características de las descargas atmosféricas en la zona geográfica de la instalación (bloque 9) y teniendo en cuenta los datos relevantes del diseño de esta última (bloque 10: resistencias de puesta a tierra, hilo de guardia, NBA de líneas, etc.) se calculan las sobre tensiones de origen atmosférico que habrán de soportar los aislamientos no protegidos (bloque 11).

Una vez determinada las solicitaciones de este tipo, se elige el NBA conveniente y si es necesario, se reajustan los aislamientos auto regenerativos (bloque 12) para asegurar que poseen un NBA

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

suficiente, manteniendo a la vez el NAIM mínimo definido anteriormente (bloque 8).

Si los aislamientos así definidos no resultan económicamente aceptables, se modificarán las características de la instalación para reducir a valores convenientes las sobre tensiones atmosféricas resultantes (línea de trazos del bloque 12 al 10).

El procedimiento descrito en forma esquemática, muestra la complejidad de la coordinación de los niveles de aislación, tanto desde el punto de vista técnico, como del económico.

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

Solicitaciones sobre los aislamientos eléctricos (estructuras aislantes en general)	Solicitaciones dieléctricas	Normales	Tensiones de servicio alteras a frecuencia industrial Tensiones de servicio continuas	
		Excepcionales o anormales	Sobretensiones por descargas atmosféricas Sobretensiones de maniobra Sobretensiones temporarias a frecuencia industrial Sobretensiones temporarias continuas	
	Condiciones de Servicio	Ambientales (para aislamientos externos y superficiales)	Atmosféricas	Temperatura Presión Altitud Humedad
			Meteorológicas	Viento Niebla Nieve Hielo y Escarcha
De Contaminación		Marina (Sal) Desértica (polvo, arena) Agrícola (polen) Industrial y Urbana (povros minerales)		
Otras (para aislamientos internos)	Esfuerzos mecánicos Impactos Calentamiento propio en servicio Choques térmicos			

Figura 1

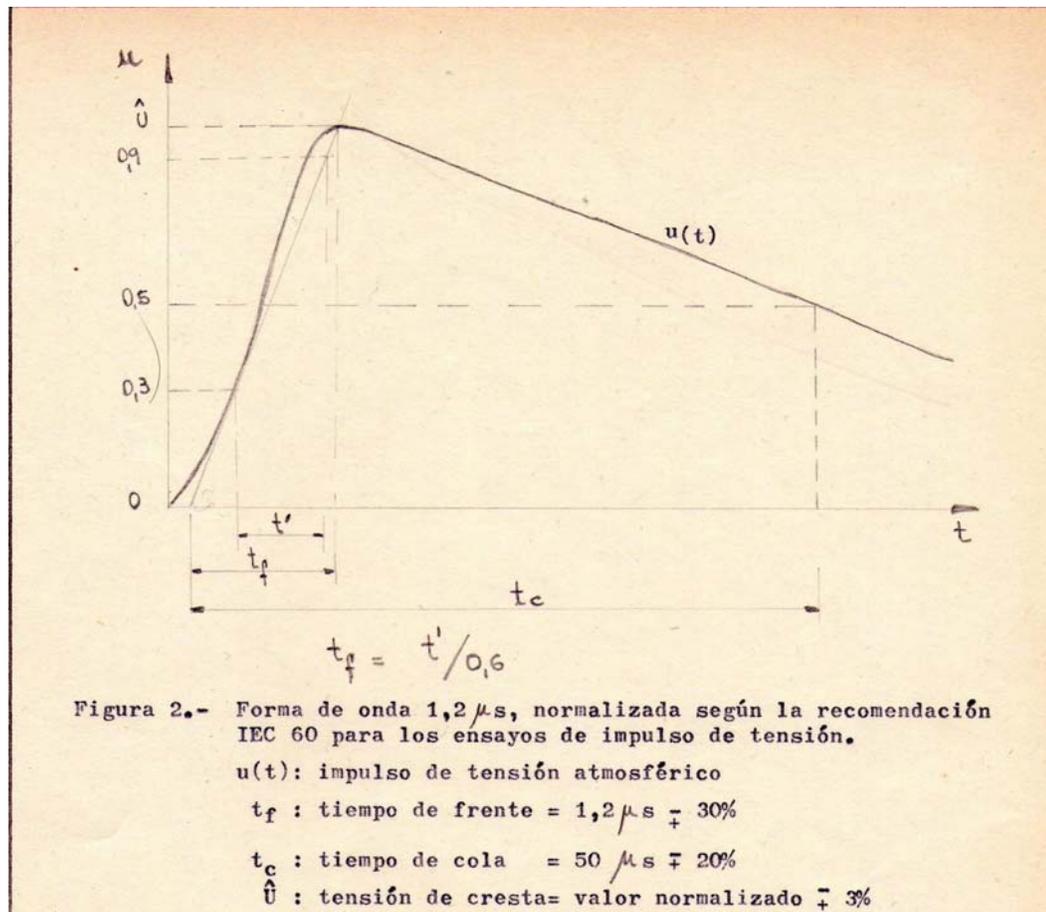


Figura 2

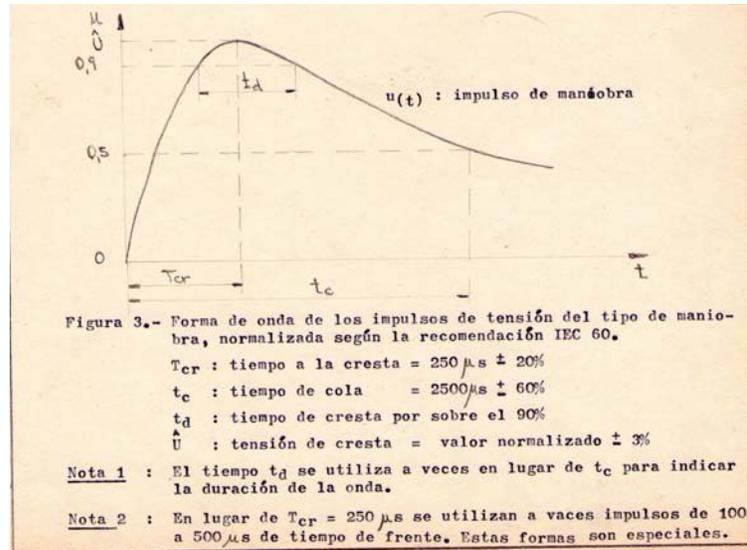


Figura 3

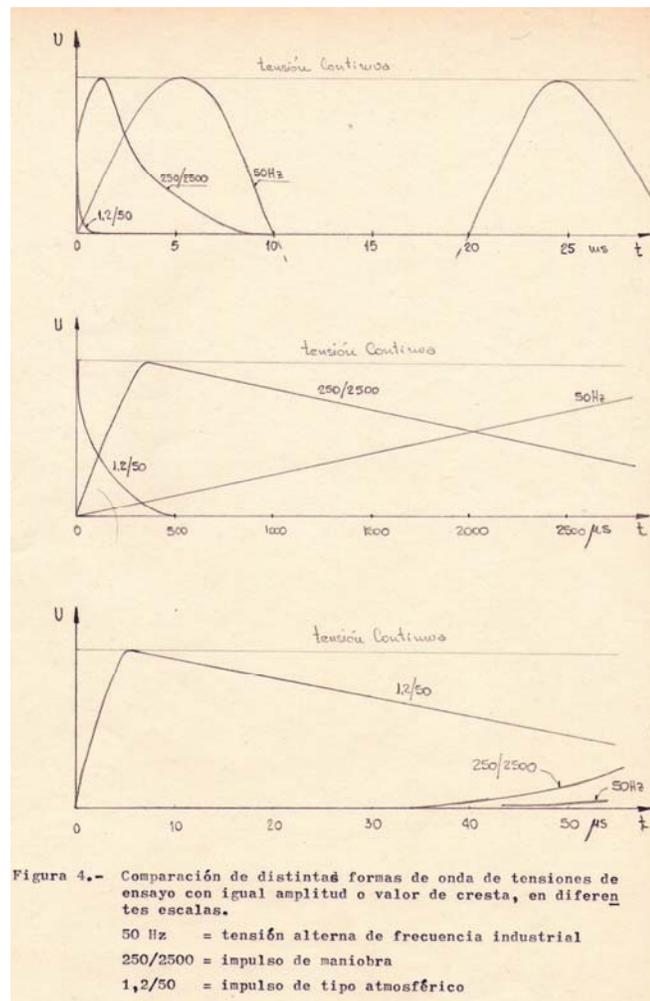


Figura 4

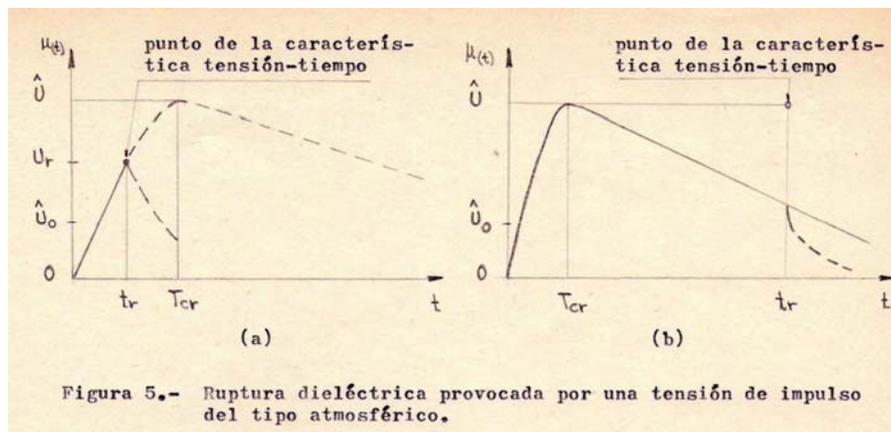


Figura 5

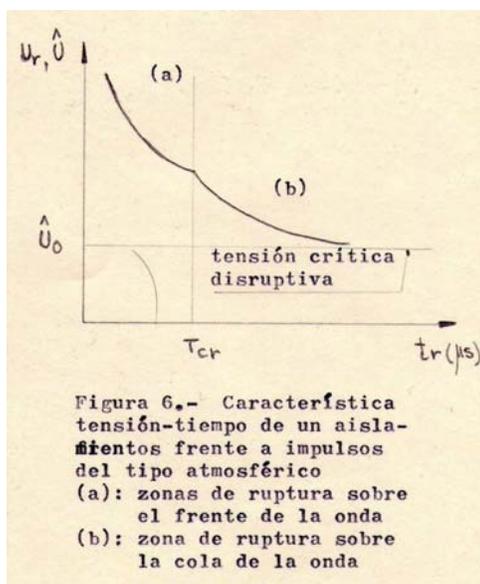


Figura 6

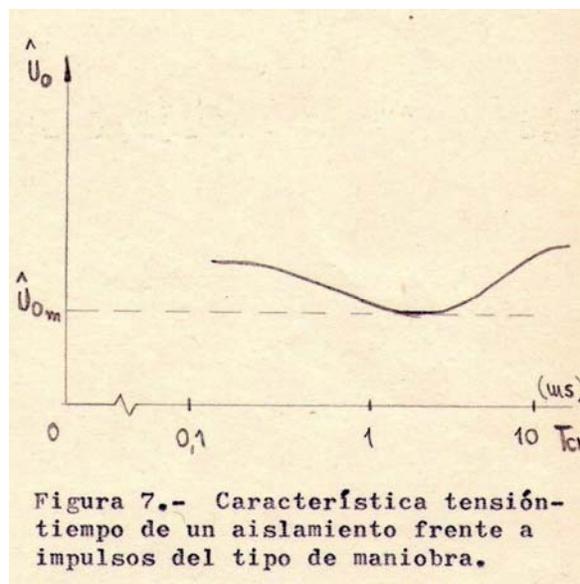


Figura 7

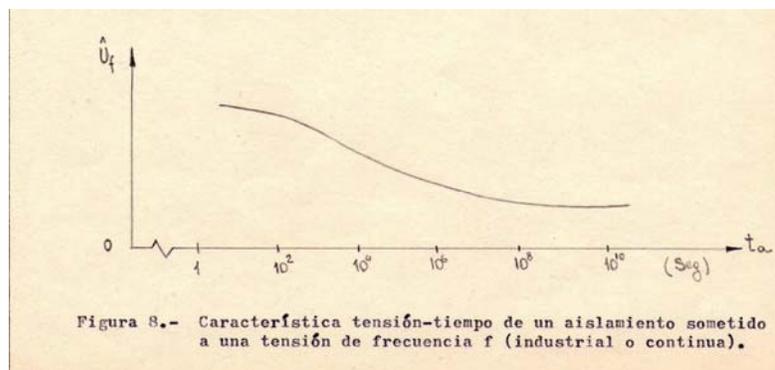


Figura 8

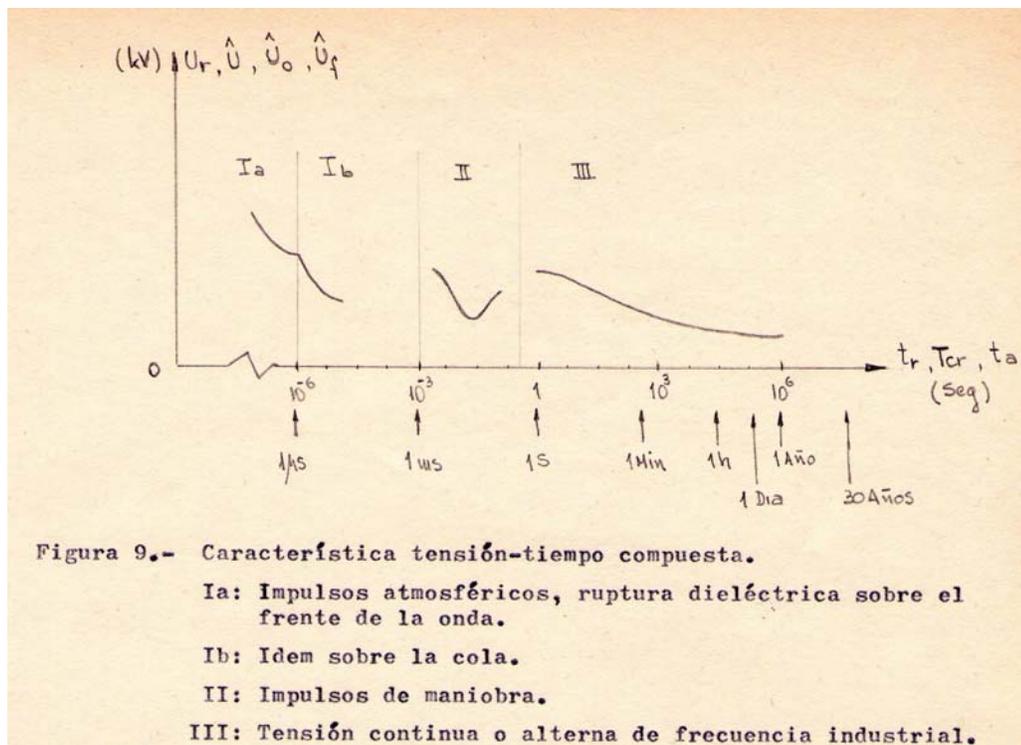


Figura 9

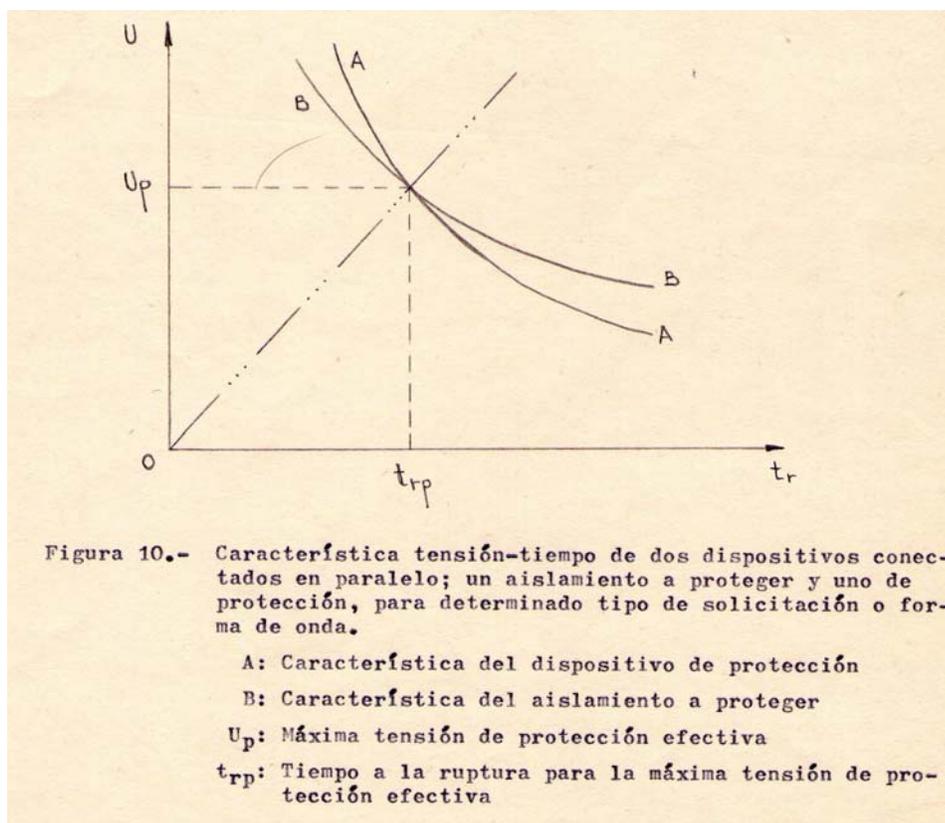


Figura 10

Cátedra: Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica

Tensión nominal entre fases $U_n$ (kV)	Tensión máxima entre fases $U_m$ (kV)	Tensión nominal del descargador $U_d$ (kV)	Nivel de protección del descargador $U_p$ (kV)	Tensiones de ensayo para los equipos eléctricos					
				Tensión de Ensayo a frecuencia industrial (kV eficaces - 1 minuto)			Tensión de ensayo con onda de impulso, positiva y negativa (kV cresta)		
				Transformadores de Potencia, reactores, etc.	Transformadores de medida, aisladores, interruptores, seccionadores	Seccionadores (entre contactos abiertos)	Transformadores de Potencia, reactores, etc.	Transformadores de medida, aisladores, interruptores, seccionadores	Seccionadores (entre contactos)
3.3	3.6	3 4.5	13 17.5	16	21	25	45	45	52
6.6	7.2	6 7.5	22.65 27	22	27	35	60	60	70
13.2	14.5	12 15	43 54	34	40	60	95	95	110
33	36	30 36	108 125	70	75	100	170	170	195
66	72	60	204 216	120 140	140	190	275 325	325	375
132	145	120	310 400	195 230	230	310	450 550	550	630
220	245	198	520 650	325 395	395	535	750 900	900	1035
330	362		460 570	460 570	510 570	680 770	1050 1300	1175 1300	1300 1500
380	420		570 740	570 740	630 740	850 900	1300 1675	1425 1675	1675 1800
500	550		630 790	630 790	680 790	900 1050	1425 1800	1550 1800	1800

Coordinación de la aislación para los sistemas eléctricos según la Norma IRAM 2211 – 1972 (los aisladores pasantes de transformadores, deberán soportar además, una tensión de ensayo con onda de impulso, cuyo valor de cresta sea 1,15 veces la tensión de ensayo con onda de impulso, correspondiente al transformador en que el aislador va instalado).

Figura 11

Máxima tensión del equipamiento $U_m$ (eficaz) - kV	Base de los valores en p.u. $2/3 U_m$ (cresta) (kV)	Tensión nominal soportada a impulsos de maniobra (cresta) p.u.	kV	Razón de las tensiones nominales soportadas a impulsos atmosféricos y de maniobra	Tensión nominal soportada a impulsos atmosféricos (cresta) kV
300	245	3.06	750	1.13	850
		3.47	850	1.27	950
362	296	2.86	850	1.12	950
		3.21	950	1.24	1050
420	343	2.76	950	1.11	1050
		3.06	1050	1.24	1175
525	429	2.45	1050	1.12	1300
		2.74	1175	1.24	1425
765	625	2.28	1425	1.11	1425
		2.48	1550	1.36	1800
				1.21	1800
				1.09	1800
				1.38	1800
				1.26	1800
				1.16	1950
				1.26	1950
				1.47	2100
				1.55	2400

Figura 12.- Niveles estándar de aislación para sistemas de A.T. según IEC - 71-1 (Rango C:  $U_m$  300 kV)

Figura 12

Solicitaciones a considerar para la coordinación	Criterios de evaluación del comportamiento de los aislamientos según las especificaciones de diseño
Solicitaciones a frecuencia industrial (50 Hz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efecto de las condiciones atmosféricas y meteorológicas para las distancias disruptivas en aire.</li> <li>Efecto de las condiciones atmosféricas y de la contaminación superficial sobre aislaciones externas (auto regenerativas).</li> <li>Envejecimiento de las aislaciones no - auto regenerativas (internos)</li> </ul>
Sobretensiones de origen atmosférico (onda de 1,2/50 seg.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluación de la efectividad del blindaje de líneas y subestaciones expuestas</li> <li>Determinación del probable número de interrupciones de servicio por año</li> <li>Fijación de los coeficientes de seguridad disponibles para los aislamientos no - auto regenerativos, protegidos por dispositivos especiales (descargadores).</li> </ul>
Sobretensiones de maniobra onda 250/2500 seg.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinación del riesgo total de fallas por sobretensiones de maniobra para las aislaciones no protegidas (auto regenerativas).</li> <li>Coefficientes de seguridad disponibles para las aislaciones protegidas (no - auto regenerativas).</li> </ul>

Aspectos considerados para una evaluación técnica de la coordinación de aislamientos frente a los distintos tipos de solicitaciones.

Figura 13

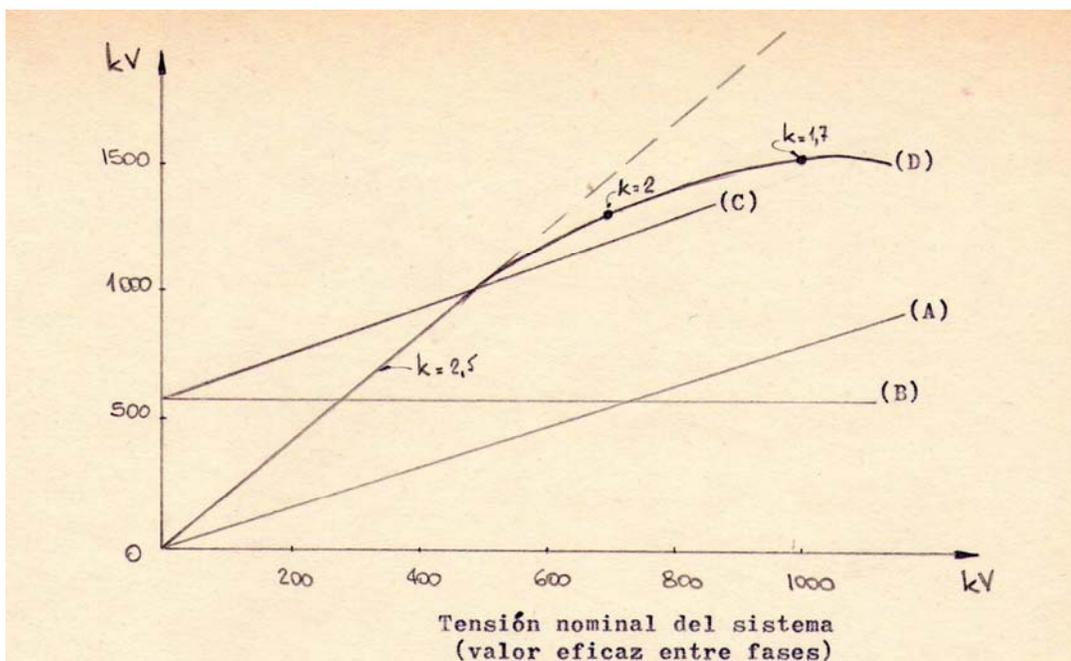


Figura 14.- Magnitudes típicas de distintos tipos de solicitaciones eléctricas vs. tensión nominal del sistema.

- (A): Tensión de cresta fase-tierra a la frecuencia de servicio  $(\sqrt{2}/\sqrt{3}) \cdot U_m$
- (B): Tensión máxima por sobretensiones atmosféricas (600kV)
- (C): Sobretensiones atmosféricas + tensión máxima a la frecuencia de servicio: (A) + (B)
- (D): Tensión máxima por sobretensiones de maniobra:  $k \cdot (A)$

Figura 14

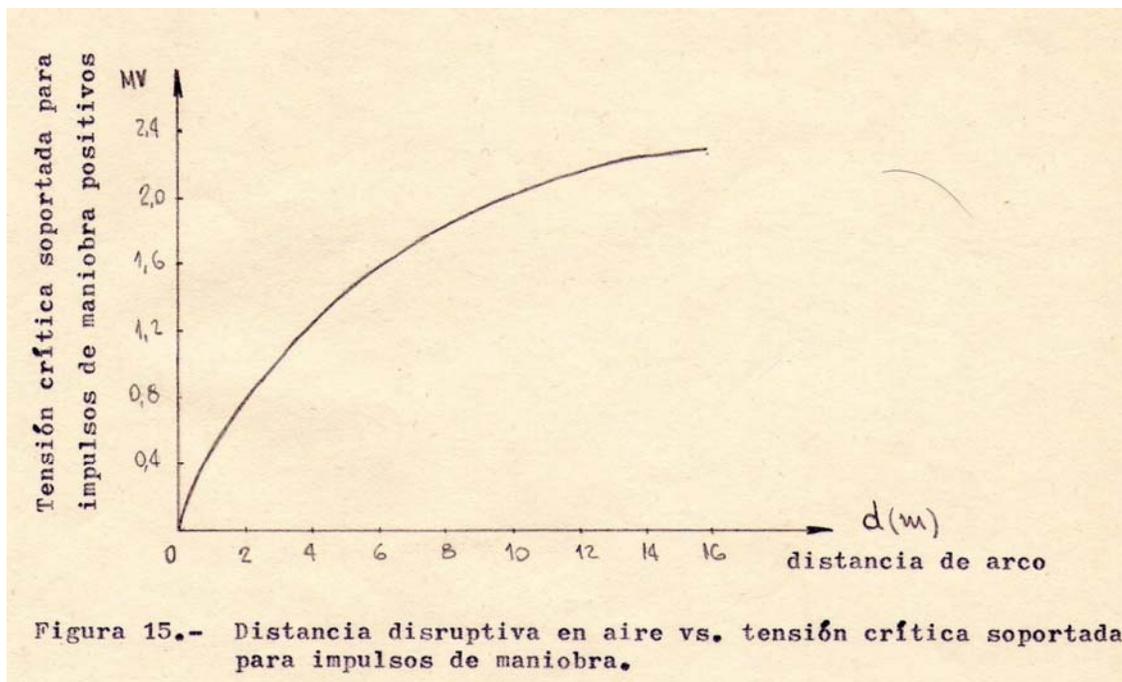


Figura 15

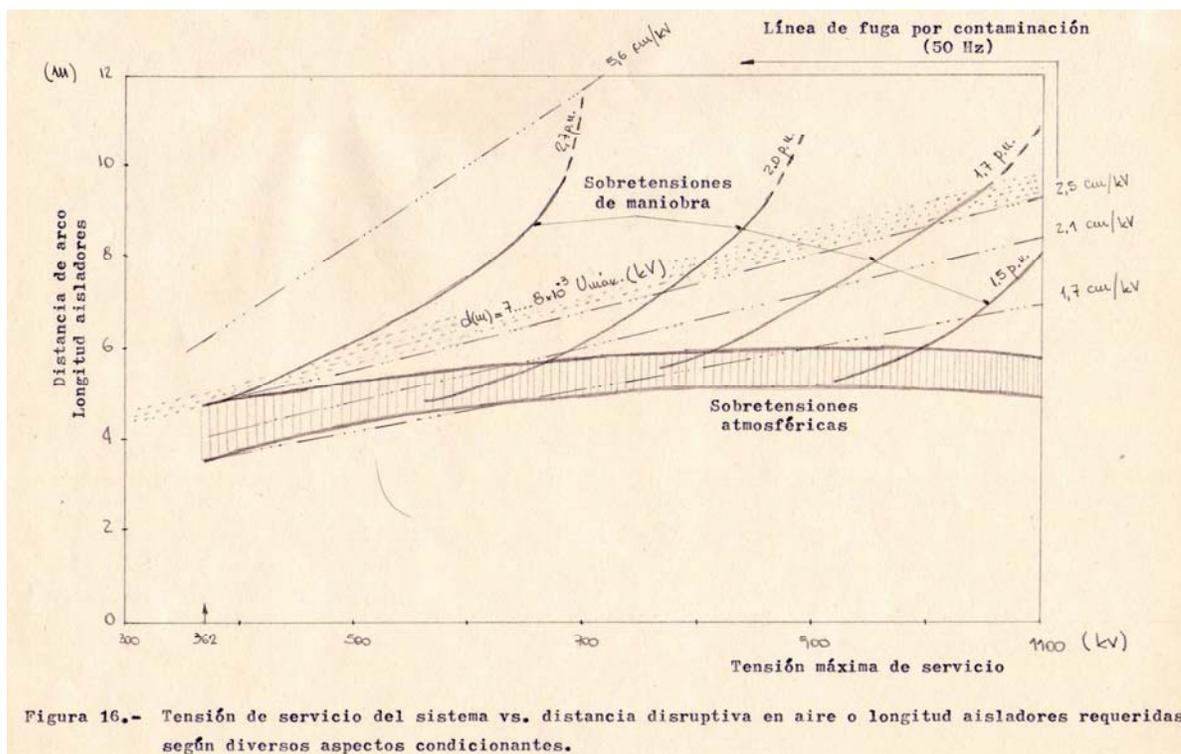


Figura 16

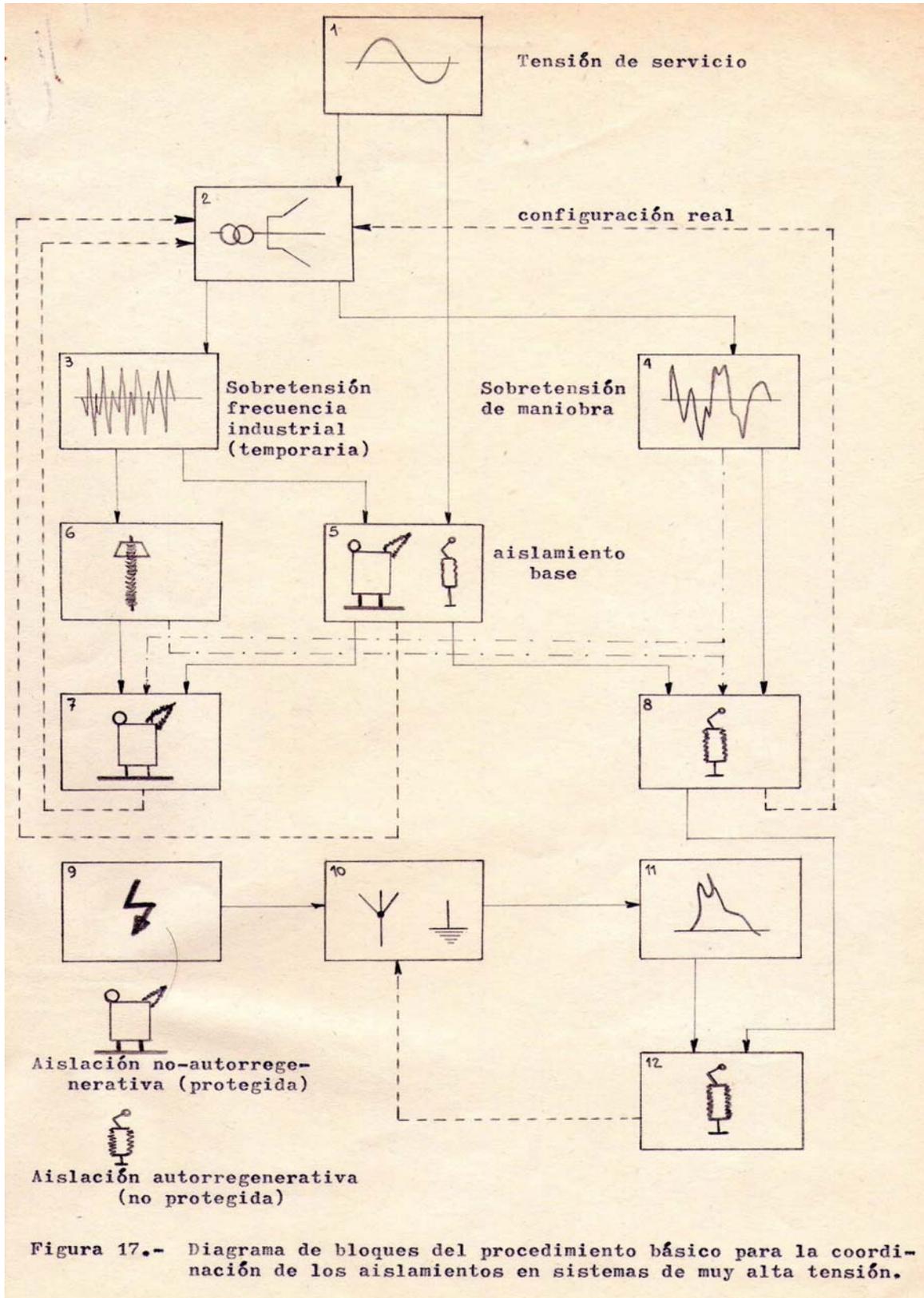


Figura 17

