

**Coordinador**  
**J. A. MARTÍNEZ VELASCO**

**Coordinación de aislamiento  
en redes eléctricas de alta tensión**

***Coordinación de  
Aislamiento  
en Redes Eléctricas  
de Alta Tensión***

**Coordinador: Juan A. Martínez Velasco**  
**Universitat Politècnica de Catalunya**  
**Barcelona**

**Coordinador**  
**J. A. MARTÍNEZ VELASCO**

# **Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión**

## **Autores**

- Domingo Beato Castro *Empresarios Agrupados*
- Ferley Castro Aranda *Universidad del Valle (Cali, Colombia)*
- Francisco Fernández Gálvez *Empresarios Agrupados*
- Fernando Garnacho Vecino *LCOE – Universidad Politécnica de Madrid*
- Miguel García-Gracia *CIRCE – Universidad de Zaragoza*
- José Manuel García Rubio *CIRCE – Universidad de Zaragoza*
- Blas Hermoso Alameda *Universidad Pública de Navarra*
- Jacinto Martín Arnedo *ITC2 – Barcelona*
- Pablo Martín Muñoz *Red Eléctrica de España*
- Juan A. Martínez Velasco *Universitat Politècnica de Catalunya*
- Luis Montañés Bellosta *ENDESA (ERZ)*

## **Contenido del libro**

- Capítulo 1 – Introducción
- Capítulo 2 – Sobretensiones en redes de alta tensión
- Capítulo 3 – Aislamiento eléctrico
- Capítulo 4 – Puestas a tierra
- Capítulo 5 – Apantallamiento de líneas y subestaciones
- Capítulo 6 – Protección contra sobretensiones. Pararrayos
- Capítulo 7 – Directrices de representación
- Capítulo 8 – Cálculo numérico de procesos transitorios en redes eléctricas
- Capítulo 9 – Cálculo numérico de sobretensiones. Ejemplos
- Capítulo 10 – Coordinación de aislamiento
- Capítulo 11 – Casos prácticos. Estudios de coordinación de aislamiento gama I
- Capítulo 12 – Casos prácticos. Estudios de coordinación de aislamiento gama II
- Anexo I – El método de Monte Carlo
- Anexo II – El paquete de simulación ATP

## **Contenido de la presentación**

- Objetivos
- Sobretensiones en redes eléctricas
- Aislamiento eléctrico
- Protección contra sobretensiones
- Puestas a tierra
- Coordinación de aislamiento
- Técnicas numéricas
- Casos prácticos

## **Coordinación de aislamiento**

- Sobretensiones en redes eléctricas: Causas y efectos, caracterización
- Selección del aislamiento: primera aproximación  
*Tensión soportada = Máxima sobretensión*
- Selección del aislamiento
  - aceptando una probabilidad de fallo
  - instalando pantallas y dispositivos de protección
- Coordinación de aislamiento es la selección de la tensión soportada normalizada de los equipos teniendo en cuenta las sobretensiones que pueden aparecer, así como los medios de protección que se pueden instalar y las condiciones ambientales de la zona, para obtener un riesgo de fallo aceptable

## **Selección del aislamiento**

- Una selección óptima de los aislamientos y de los dispositivos de protección contra sobretensiones requiere un conocimiento riguroso de:
  - el origen y la distribución estadística de las sobretensiones que se pueden originar
  - la caracterización de los distintos tipos de aislamientos
  - los dispositivos de protección que es posible seleccionar o instalar
  - el coste de las distintas opciones o estrategias

## **Sobretensiones en redes eléctricas**

- El cálculo de las sobretensiones es vital para el diseño de redes eléctricas
- El cálculo servirá para escoger el nivel de aislamiento y las protecciones de los equipos
- Objetivos:
  - establecer el origen y el tipo de sobretensiones que es necesario determinar para una selección adecuada de aislamientos y medios de protección,
  - determinar la distribución estadística de las sobretensiones que serán empleadas en la selección de los aislamientos

## **Parámetros de las sobretensiones**

- *Valor de cresta:* Dependerá de la causa u origen
  - En sobretensiones temporales y de frente lento originadas por una falta o maniobra influirán el instante en el que se inicia el proceso transitorio, la carga atrapada en el lado del consumo en caso de maniobra, el amortiguamiento que introducen los distintos equipos de la red, y en algunos casos (maniobras de líneas y cables en vacío) los coeficientes de reflexión
  - En sobretensiones de frente rápido o muy rápido originadas por una maniobra hay que añadir las impedancias características de los componentes que intervienen en el proceso transitorio
  - En sobretensiones provocadas por una descarga atmosférica influirán las impedancias características de líneas, cables y otros equipos, los coeficientes de reflexión en puntos cercanos al punto de impacto, y el instante de impacto de la descarga

## **Parámetros de las sobretensiones**

- *Frecuencia de las oscilaciones*
  - Las frecuencias que aparecerán en sobretensiones oscilatorias serán debidas a la frecuencia de las fuentes que alimentan la red, las frecuencias naturales que pueden originarse entre los equipos, o la longitud de líneas, cables o conductos
  - Si la sobretensión es unidireccional (no oscilatoria) y originada por un rayo, el tiempo a la cresta dependerá fundamentalmente del tiempo a la cresta de la descarga atmosférica, y será del orden de microsegundos
- *Duración*
  - Dependerá fundamentalmente de dos factores: la causa y el amortiguamiento que introducen los equipos de la red

## **Clasificación de las sobretensiones**

- **Sobretensiones temporales**, son de larga duración (desde varios milisegundos a varios segundos), y frecuencia igual o próxima a la de operación
- **Sobretensiones de frente lento**, son generalmente originadas por maniobras, tienen una corta duración (pocos milisegundos) y se presentan con una gama de frecuencias que varía entre 2 y 20 kHz
- **Sobretensiones de frente rápido**, son generalmente causadas por el rayo, son de duración muy corta y de amplitud muy superior a la tensión de cresta nominal
- **Sobretensiones de frente muy rápido**, se originan generalmente con faltas y maniobras en subestaciones de SF6, su duración es de pocos micro-segundos, y su frecuencia es generalmente superior a 1 MHz

## **Clasificación de las sobretensiones**

- **Sobretensión de baja frecuencia**

Es de larga duración y se origina con una frecuencia igual o próxima a la de operación. Este tipo de sobretensiones se divide en:

- **Tensión permanente a frecuencia industrial**

Tensión a frecuencia de operación, con un valor eficaz constante, y aplicada permanentemente.

- **Sobretensión temporal**

Sobretensión de frecuencia industrial y duración relativamente larga. Puede ser amortiguada o débil-mente amortiguada. Según la causa, su frecuencia puede ser distinta o igual a la frecuencia de operación de la red.

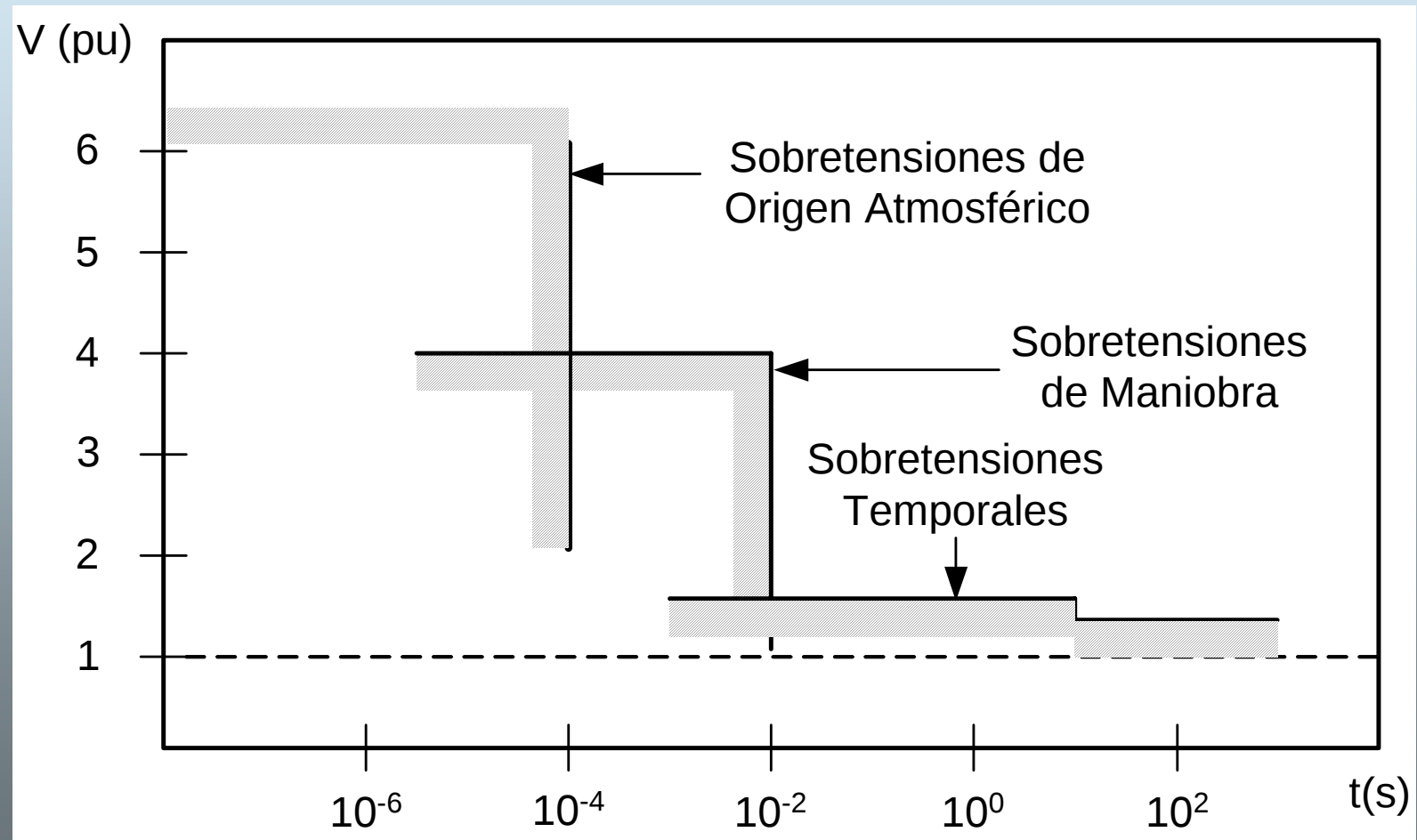
## **Clasificación de las sobretensiones**

- **Sobretensión transitoria**

Es de corta duración (algunos milisegundos), y muy amortiguada. Puede estar seguida por una sobretensión temporal; en tal caso ambas sobretensiones se analizan como sucesos separados. Estas sobretensiones se dividen a su vez en:

- **Sobretension de frente lento:** Oscilatoria, con un tiempo a la cresta comprendido entre 20 y 5000  $\mu\text{s}$ , y un tiempo de cola igual o inferior a 20 ms.
- **Sobretensión de frente rápido:** Unidireccional, con un tiempo a la cresta comprendido entre 0.1 y 20  $\mu\text{s}$ , y un tiempo de cola igual o inferior a 300  $\mu\text{s}$ .
- **Sobretensión de frente muy rápido:** Generalmente oscilatoria, con un tiempo a la cresta inferior a 0.1  $\mu\text{s}$ , una duración total inferior a 3 ms, y oscilaciones de frecuencias de hasta 100 MHz.

## Clasificación de las sobretensiones



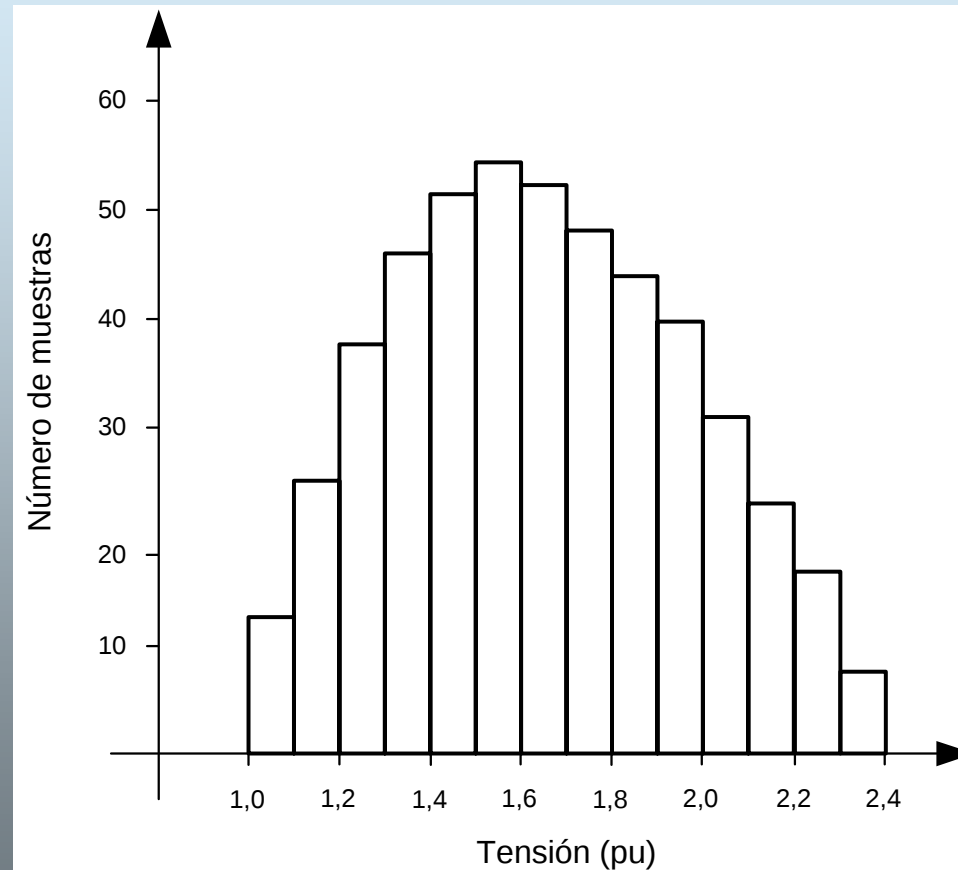
## **Configuraciones de aislamiento**

- Según UNE-EN 60071-1:
  - **Trifásico**: Tiene tres bornes de fase, un borne de neutro y un borne de tierra
  - **Fase-tierra**: Configuración trifásica en la que no se tiene en cuenta los bornes de dos fases, y en la que el borne de neutro está generalmente conectado a tierra
  - **Fase-fase**: Configuración trifásica en la que no se considera un borne de fase. En algunos casos tampoco se consideran los bornes de neutro y de tierra
  - **Longitudinal**: Configuración con dos bornes de fase y uno de tierra. Los bornes de fase pertenecen a la misma fase de una red trifásica, separada temporalmente en dos partes independientes bajo tensión. Los cuatro bornes de las otras dos fases no se tienen en cuenta o están conectados a tierra

## **Sobretensiones en redes eléctricas**

- Muchas sobretensiones tienen carácter estadístico
- Las sobretensiones originadas por maniobras y las causadas por el rayo pueden ser descritas por una distribución estadística debido a la naturaleza aleatoria de parámetros y variables involucradas
- El cálculo de la distribución estadística de un tipo de sobretensión requiere de un método probabilista cuya aplicación puede describirse como sigue:
  - Selección de una distribución estadística para todas las variables y parámetros de carácter aleatorio.
  - Desarrollo de un modelo matemático para el sistema en estudio, teniendo en cuenta el tipo de sobretensión a calcular.
  - Aplicación de un procedimiento de cálculo estadístico, generalmente basado en el método de Monte Carlo.

## **Sobretensiones en redes eléctricas**



**Histograma de sobretensiones originadas por maniobras**

# Sobretensiones en redes eléctricas

## Distribución estadística de sobretensiones

- Función de distribución acumulada

$$F_s(u) = P[U \leq u] = \int_0^u f_s(U) \cdot dU$$

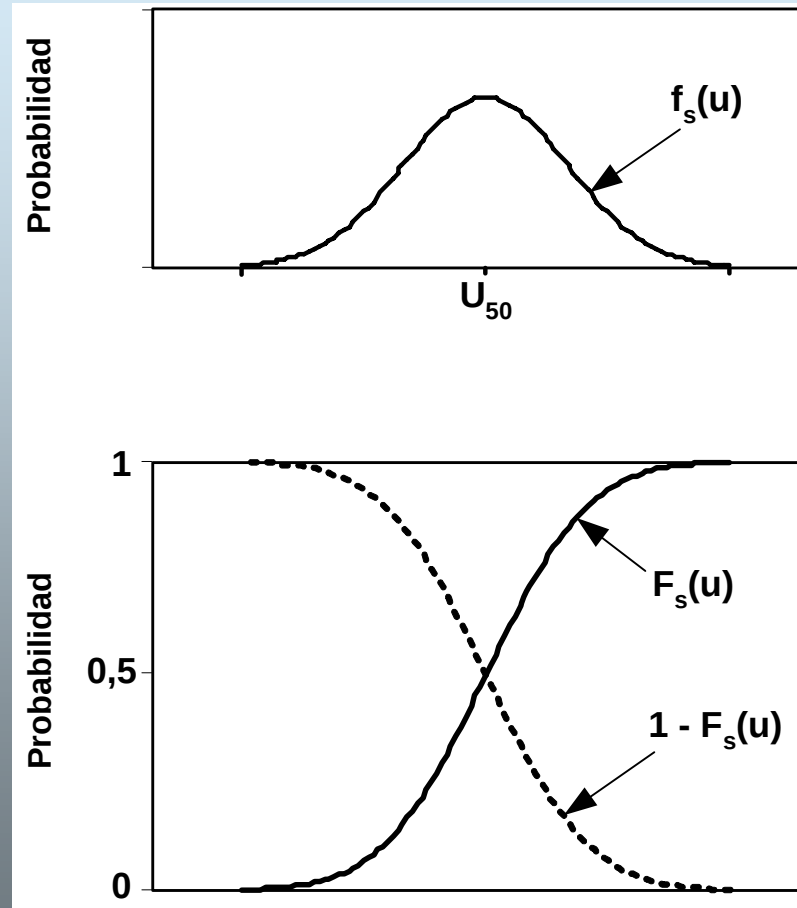
siendo  $f_s(U)$  la función de densidad de probabilidad

Esta función permite obtener la probabilidad de que se origine una sobretensión con un valor de cresta inferior a un valor determinado

- Una alternativa es la función complementaria que proporciona la probabilidad de que la sobretensión tenga un valor de cresta superior a un valor determinado

$$P[U > u] = \int_u^{\infty} f_s(U) \cdot dU$$

## Sobretensiones en redes eléctricas



Distribución estadística (normal) de sobretensiones

## **Caracterización del aislamiento**

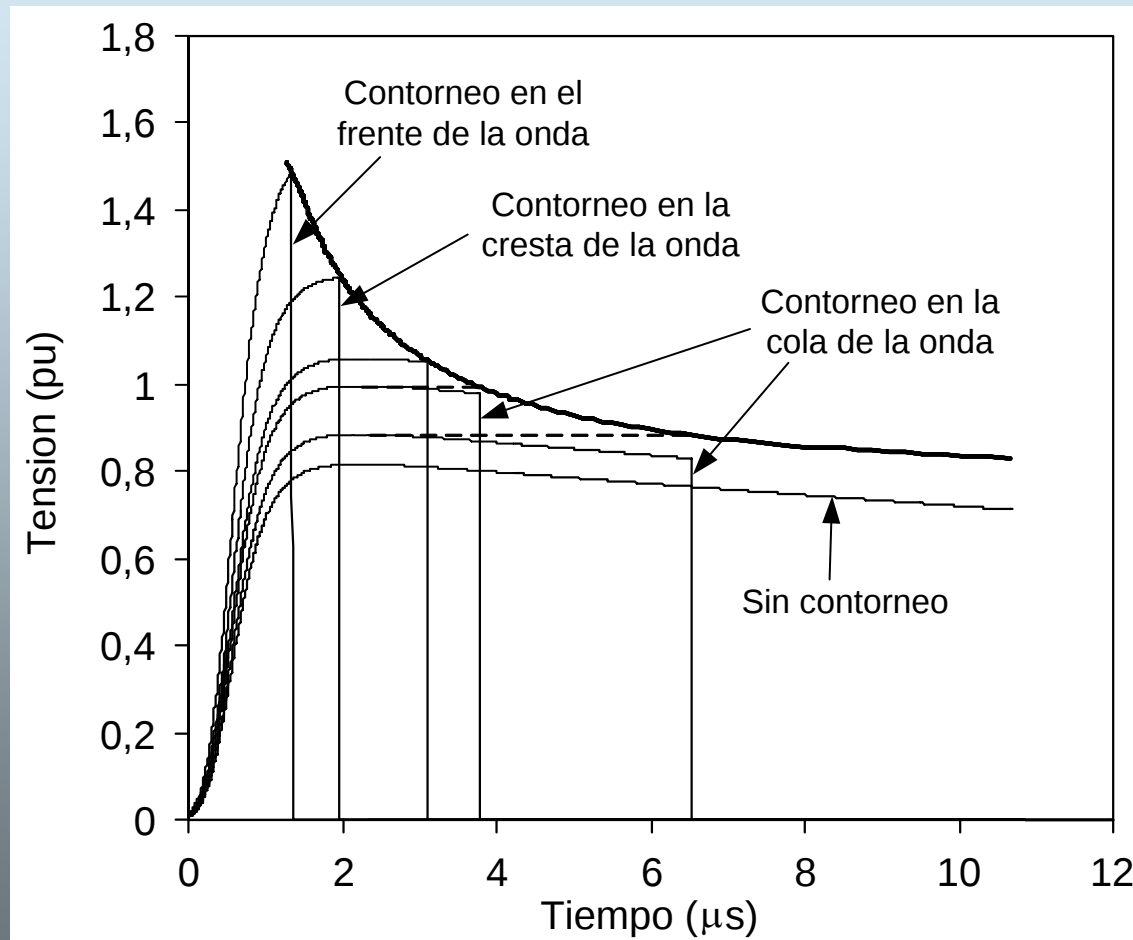
### **Clasificación del aislamiento**

- Primera clasificación:
  - Aislamiento autorregenerable: recupera sus propiedades cuando desaparece el contorno y las causas que lo han provocado
  - Aislamiento no autorregenerable: puede quedar total o parcialmente averiado después de una descarga disruptiva
- Segunda clasificación:
  - Aislamiento externo: es la distancia a través del aire o de una superficie exterior en contacto con el aire sometido a sollicitaciones dieléctricas y ambientales (humedad y contaminación)
  - Aislamiento interno: es la parte interna del aislamiento de un equipo eléctrico que está protegido de las sollicitaciones ambientales mediante una o varias envolventes
- En general, el aislamiento externo es autorregenerable y el aislamiento interno es no autorregenerable

## **Caracterización del aislamiento**

- La rigidez dieléctrica de un aislamiento depende de
  - la forma de onda de tensión aplicada (pendiente del frente, valor de cresta, pendiente de cola)
  - la polaridad
  - las condiciones ambientales, en el caso del aislamiento externo
- La descarga disruptiva de un aislamiento es un fenómeno de naturaleza estadística
  - Un mismo aislamiento puede aguantar unas cuantas veces y fallar otras veces cuando es sometido de forma repetitiva a la misma onda de tensión, manteniendo constantes la polaridad y las condiciones ambientales

## Caracterización del aislamiento



**Curvas tensión-tiempo**

## **Proceso de descarga disruptiva**

- La descarga disruptiva en un aislamiento gaseoso empieza con un proceso de ionización causado por los electrones libres que son acelerados por el campo eléctrico aplicado
- Con estos electrones libres se puede originar una avalancha que ioniza los átomos neutros y las moléculas, y libera nuevos electrones
- La descarga disruptiva del aislamiento tiene lugar cuando la avalancha consigue atravesar el espacio comprendido entre los electrodos
- La avalancha se iniciará si el valor del campo eléctrico aplicado entre electrodos supera el umbral de efecto corona, pero la descarga disruptiva o contorno sólo tendrá lugar si el campo eléctrico es suficientemente elevado

## **Especificación del aislamiento**

- La rigidez dieléctrica de un aislamiento se puede describir mediante el nivel de aislamiento normalizado (conjunto de tensiones soportadas normalizadas asociadas a la tensión más elevada en régimen permanente,  $U_m$ , a la que será sometido el equipo eléctrico)
  - a las tensiones de la **gama I** ( $1 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$ ) se asocian la tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial, medida en kV eficaces, y la tensión soportada normalizada a impulsos tipo rayo, medida en kV cresta
  - a las tensiones de la **gama II** ( $245 \text{ kV} < U_m$ ) se asocian la tensión soportada normalizada a impulsos tipo maniobra y la tensión soportada normalizada a impulsos tipo rayo, ambas medidas en kV cresta

## **Especificación del aislamiento**

- La rigidez dieléctrica de un aislamiento autorregenerable se comporta de acuerdo con una función de densidad de probabilidad normal o gaussiana

$$f_a(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(u - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

siendo  $\mu$  el valor medio y  $\sigma$  la desviación estándar

- El valor medio es la tensión soportada dieléctrica, la tensión para la que el aislamiento tiene una probabilidad de fallo del 50%, y se suele anotar como  $U_{50}$
- La desviación estándar está entre el 2 y el 3% de  $U_{50}$  para impulsos tipo rayo y entre el 5 y el 7% de  $U_{50}$  para impulsos tipo maniobra

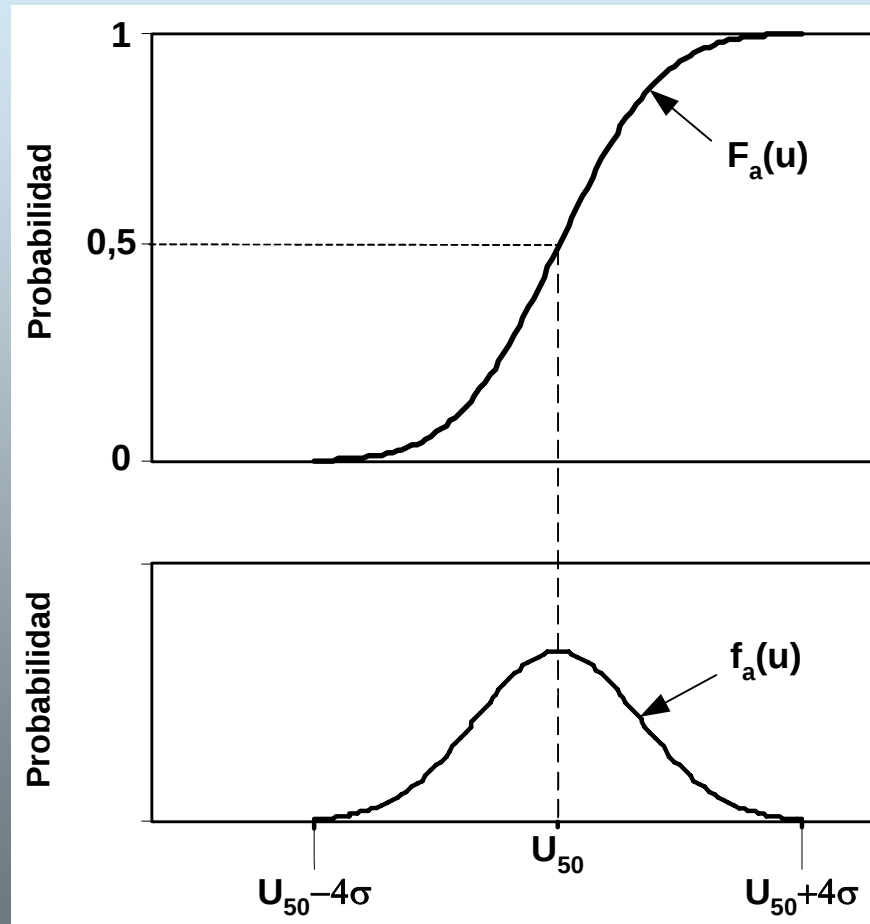
## **Especificación del aislamiento**

- El comportamiento estadístico del aislamiento se suele especificar mediante la función de distribución acumulada

$$F_a(u) = \int_0^u f_a(U) \cdot dU$$

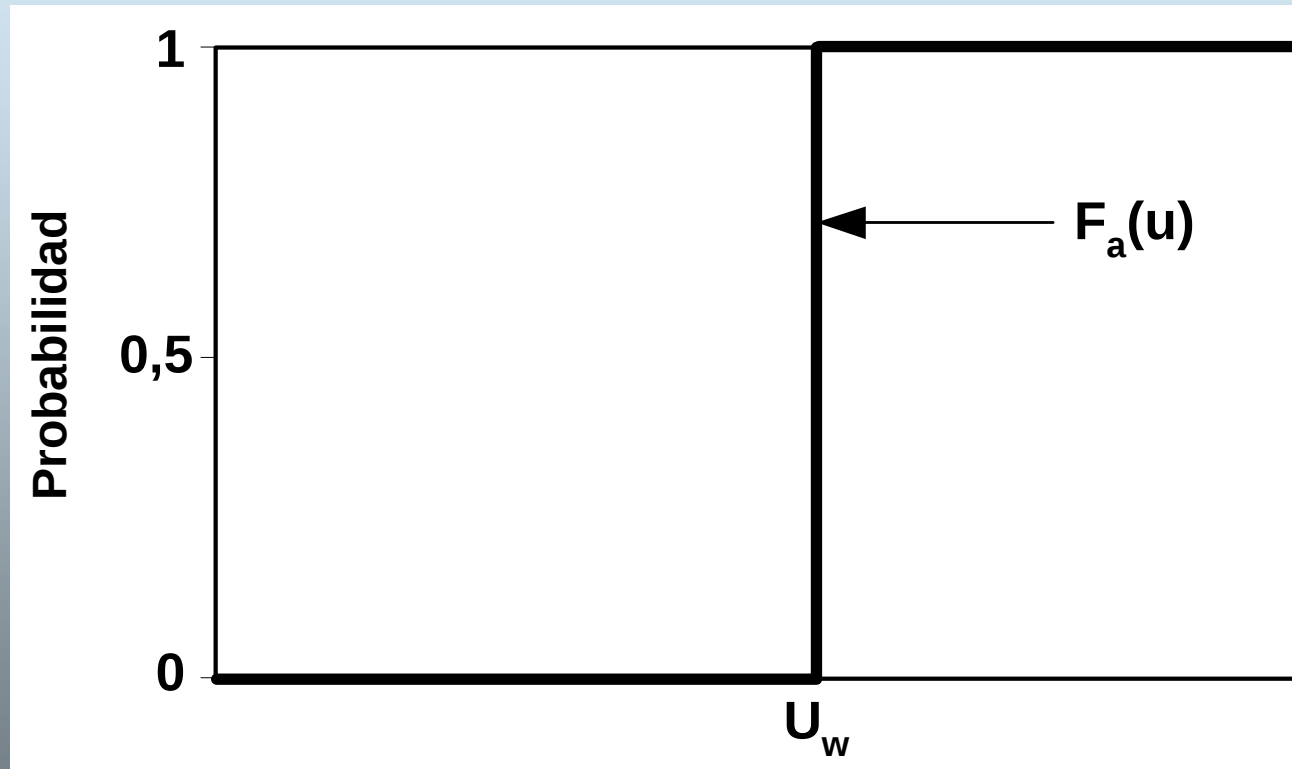
- La función  $F_a(u)$  indica la probabilidad de que la tensión disruptiva sea igual o inferior a un determinado valor
- Relación entre la función de densidad de probabilidad y la función de probabilidad acumulada para una distribución normal (ver figuras)

## Especificación del aislamiento



Característica dieléctrica de un aislamiento

## Especificación del aislamiento



Característica dieléctrica de un aislamiento  
no autorregenerable

## **Protección contra sobretensiones**

- Principios de protección
  - limitar las sobretensiones
  - prevenir la aparición de sobretensiones
- Medios o métodos
  - instalación de pararrayos (contra sobretensiones por maniobra y de origen atmosférico)
  - instalación de pantallas (contra sobretensiones de origen atmosférico)
  - cierre controlado de interruptores (contra sobretensiones por maniobra)
  - diseño de puesta a tierra (contra sobretensiones por maniobra y de origen atmosférico)

## **Pararrayos**

- Tipos de pararrayos
  - Pararrayos de SiC
  - Pararrayos de ZnO
- Pararrayos de óxidos metálicos (ZnO)
  - Ventajas
  - Características
  - Selección

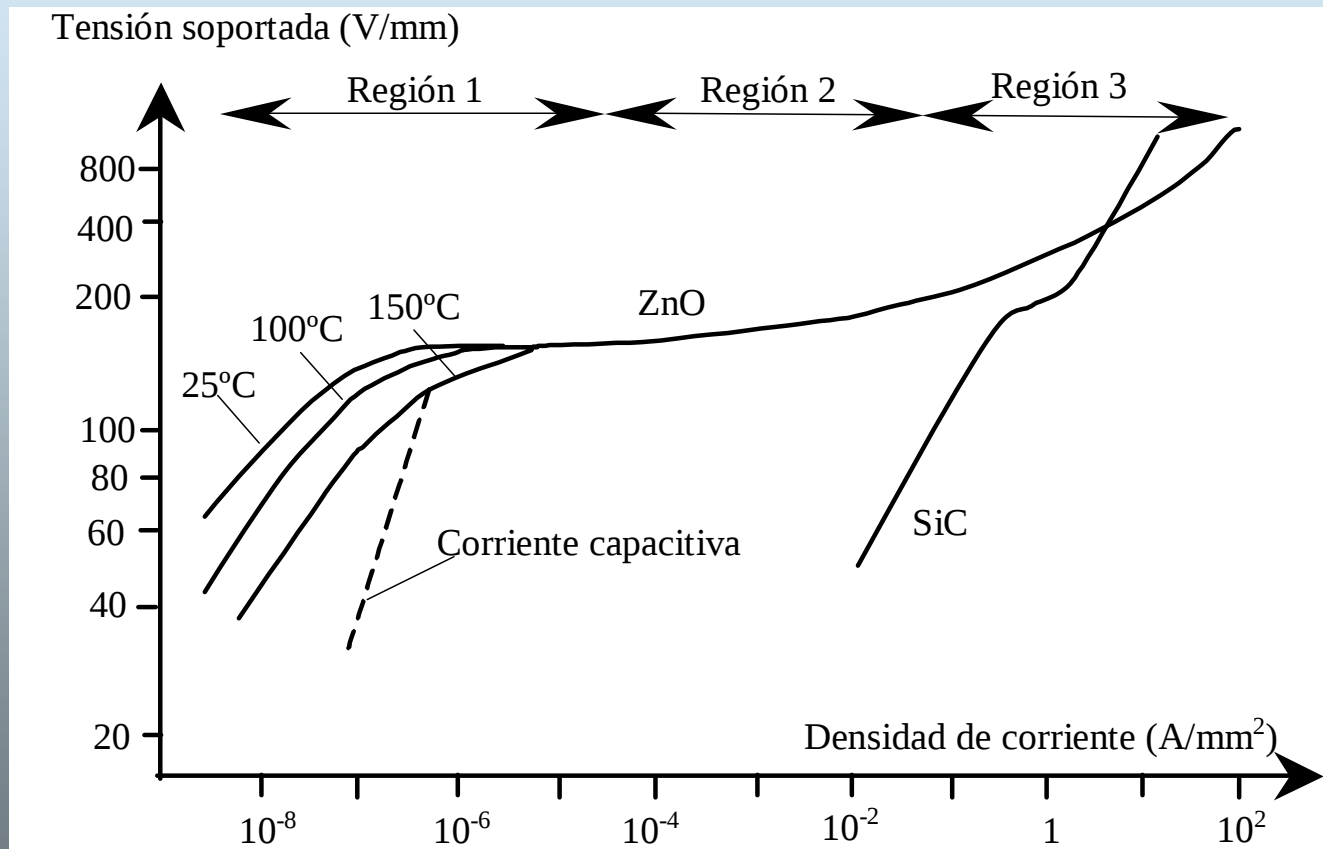
## **Pararrayos de óxidos metálicos**

- **Ventajas**
  - su coeficiente de no-linealidad es muy superior al del SiC, lo que permite prescindir de los explosores y de las resistencias y condensadores en paralelo
  - es posible conocer su estado de envejecimiento midiendo la corriente resistiva
  - presentan una tensión residual muy estable, puesto que la ausencia de explosores elimina el carácter errático asociado al desgaste de estos
  - permiten una disminución del riesgo de explosión
- Estos pararrayos han sido tradicionalmente de envoltente cerámica; en los 90 aparecen envoltentes poliméricas que
  - disminuyen los riesgos derivados de explosiones por sobrepresiones en el interior de los mismos
  - proporcionan mayor estabilidad a los varistores
  - permiten disminuir el tamaño sin incrementar el precio

## **Pararrayos de óxidos metálicos**

- La característica V-I puede ser dividida en 3 regiones
  - Región 1:  $I < 1 \text{ mA}$ , fundamentalmente capacitiva; el valor MCOV del pararrayos es seleccionado en ésta región
  - Región 2:  $1 \text{ mA} < I < 2 \text{ kA}$ , fundamentalmente resistiva; es la zona de sobretensiones temporales (TOV) y de maniobra
  - Región 3:  $I = 1 \div 100 \text{ kA}$ , el pararrayos se comporta como una resistencia
- La disipación de energía aumenta con la temperatura; la inestabilidad térmica puede evitarse mediante un diseño adecuado de la envolvente
- La tensión permanente entre los terminales del pararrayos debe ser siempre igual o inferior a MCOV
- Las sobretensiones temporales debe ser limitada y estar dentro del tiempo especificado por el fabricante

## Pararrayos de óxidos metálicos



**Característica tensión-intensidad**

## **Pararrayos de óxidos metálicos**

- Características para definir y seleccionar pararrayos
  - Tensión nominal o asignada:  $U_r$
  - Tensión de funcionamiento continuo:  $U_c$
  - Capacidad frente a sobretensiones temporales:  $TOV_c$
  - Corriente nominal de descarga:  $I_n$ 
    - Clase de descarga de línea
  - Tensión residual o de descarga:  $U_{res}$ 
    - Nivel de protección a impulsos tipo maniobra:  $S IPL$
    - Nivel de protección a impulsos tipo rayo:  $L IPL$
  - Clase de limitador de presión
  - Línea de fuga
  - Corriente permanente del pararrayos
  - Presencia de dispositivo de desconexión
  - Frecuencia asignada

## **Pararrayos de óxidos metálicos**

### **Niveles de protección**

- Efecto del tiempo a la cresta
  - La magnitud y el tiempo a la cresta de la tensión de descarga son funciones de la magnitud y el tiempo a la cresta de la corriente de descarga
    - un frente de corriente de  $8 \mu\text{s}$  origina un tiempo de frente de tensión de alrededor de  $7 \mu\text{s}$ , mientras un frente de corriente de  $1 \mu\text{s}$  resulta en un frente de tensión de alrededor de  $0.5 \mu\text{s}$
  - Un modelo adecuado de pararrayos debe, por tanto, incluir el efecto del tiempo a la cresta

## **Pararrayos de óxidos metálicos**

### **Niveles de protección**

- Nivel de protección a impulsos tipo maniobra  
(*SIPL, Switching impulse protection level*)
  - Es el valor máximo de la tensión residual del pararrayos a las corrientes de impulso tipo maniobra especificadas
- Nivel de protección a impulsos tipo rayo  
(*LIPL, Lightning impulse protection level*)
  - Es la máxima tensión residual del pararrayos para la corriente nominal de descarga tipo rayo

## **Pararrayos de óxidos metálicos**

### **Márgenes de protección**

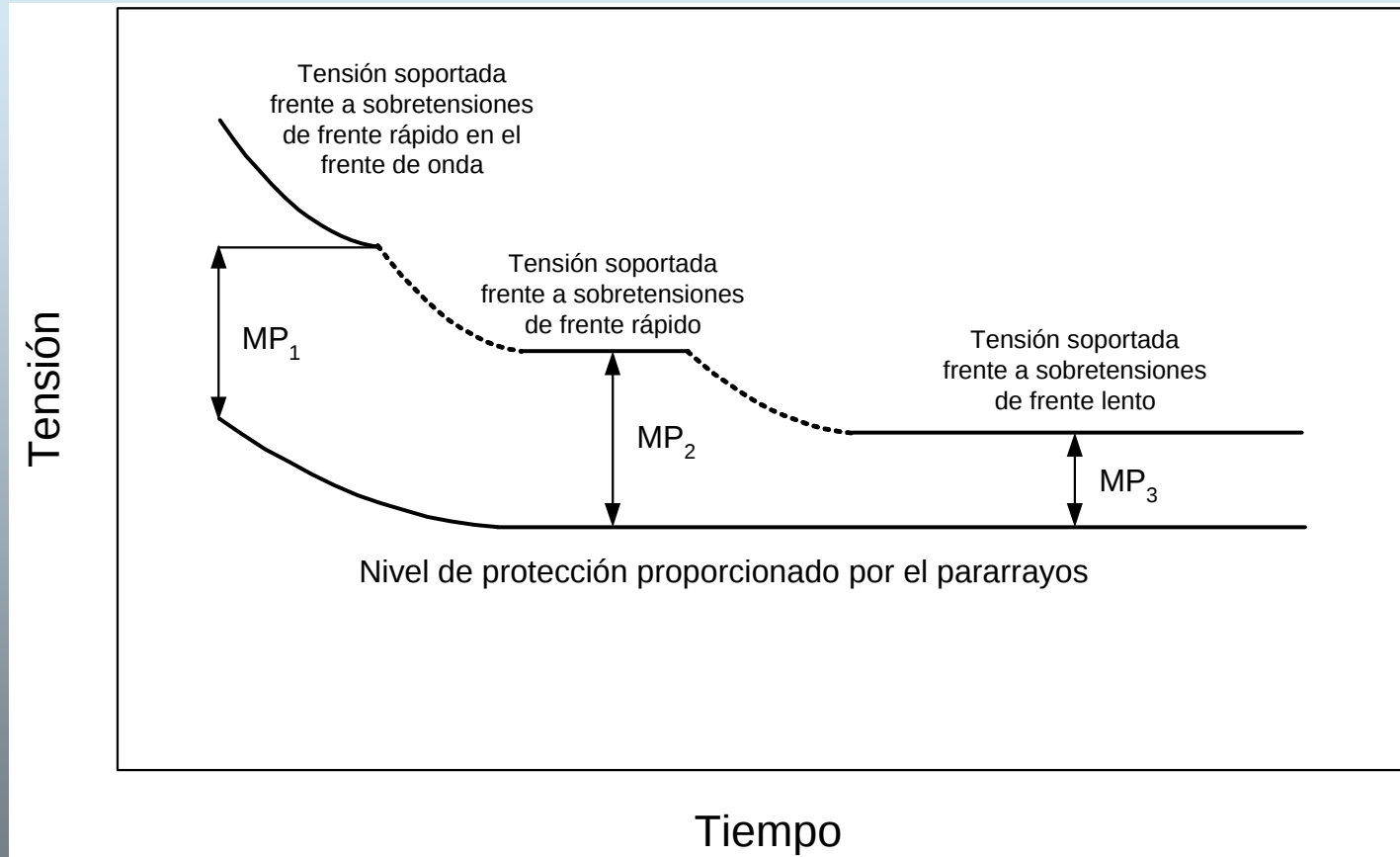
- Margen de protección a impulsos tipo rayo: es el cociente entre la tensión soportada a impulsos tipo rayo de la aparamenta a proteger ( $L/W$ , *Lightning Impulse Withstand Level*) y el nivel de protección a impulso tipo rayo del pararrayos

El margen será igual o superior a 1.2

- Margen de protección a impulsos tipo maniobra: es el cociente entre la tensión soportada a impulsos tipo maniobra de la aparamenta a proteger ( $S/W$ , *Switching Impulse Withstand Level*) y el nivel de protección a impulsos tipo maniobra del pararrayos

El margen será igual o superior a 1.15

## Pararrayos de óxidos metálicos



Coordinación entre pararrayos y aislamiento  
Margen de protección

## **Pararrayos de óxidos metálicos**

- Criterios de selección de pararrayos:
  - Corriente nominal y clase de descarga de línea
  - Adecuación del pararrayos: El pararrayos debe ser capaz de soportar permanentemente la tensión del sistema (determinación de  $U_c$ ) y las sobretensiones temporales que se presenten durante la duración máxima que puedan tener (determinación de  $TOV_c$ ); asimismo, debe tener una línea de fuga mínima para evitar que se produzcan contorneos
  - Selección de las características de protección: El pararrayos debe limitar el valor de las sobretensiones que pueden aparecer en el sistema por debajo de los límites que es capaz de soportar la aparamenta a la que protege, para ello se definen unos márgenes de protección frente a impulsos tipo rayo y maniobra que debe garantizar el pararrayos

## **Instalación de pantallas**

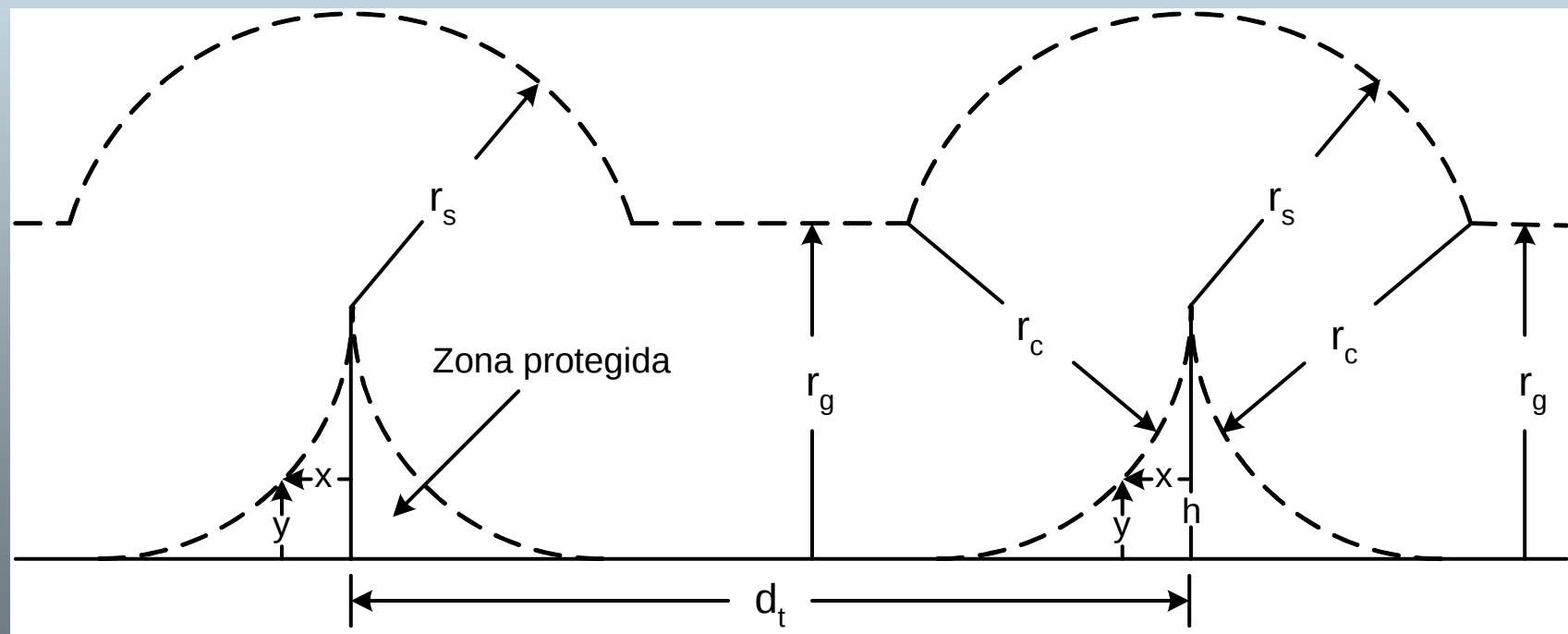
- Apantallamiento de líneas
  - El modelo electrogeométrico
- Apantallamiento de subestaciones
  - Instalación de cables de tierra
  - Instalación de puntas Franklin





## Instalación de pantallas

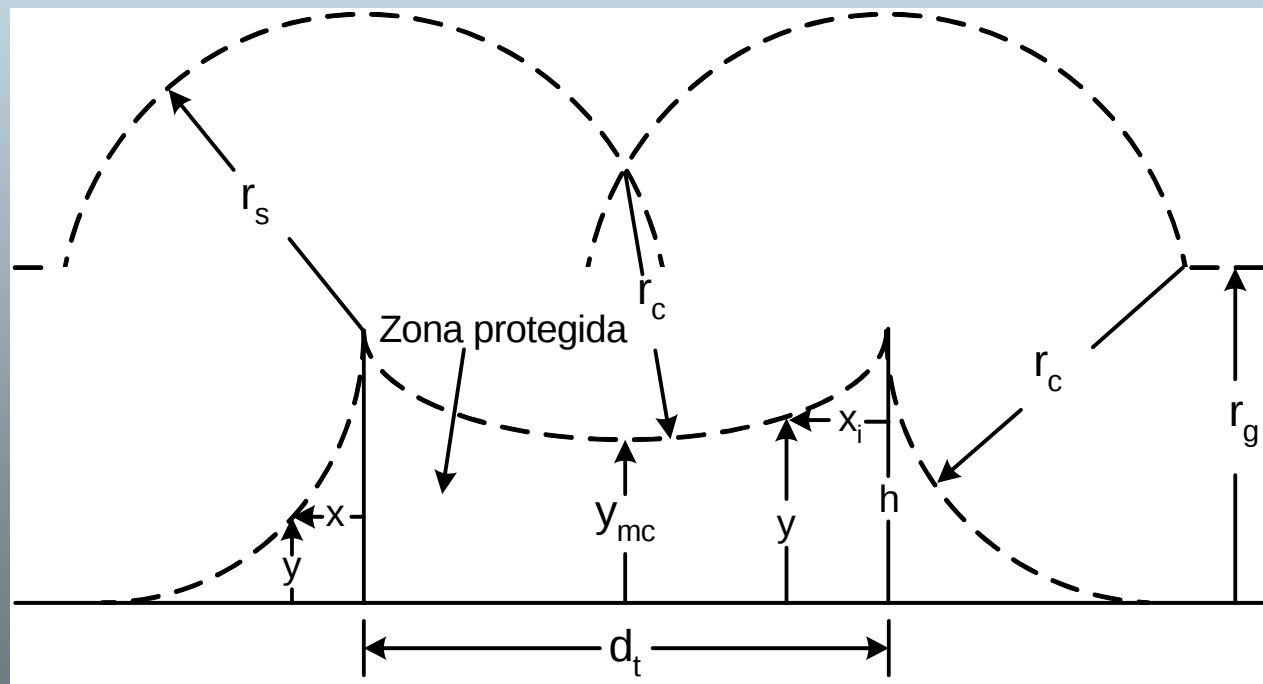
### Apantallamiento de subestaciones mediante cables de tierra



Protección parcial

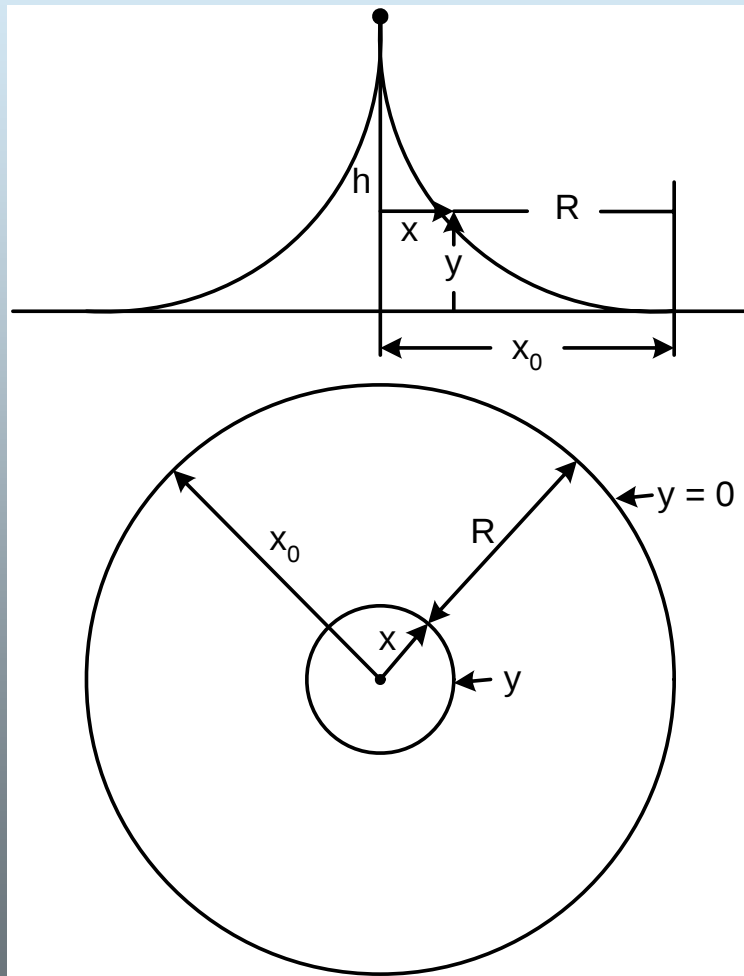
## Instalación de pantallas

### Apantallamiento de subestaciones mediante cables de tierra



**Protección total**

## Instalación de pantallas



**Apantallamiento de  
subestaciones mediante  
una punta Franklin**

$$R = \sqrt{r_c^2 - [r_g - y]^2}$$

$$x = R - \sqrt{r_s^2 - [r_g - h]^2}$$

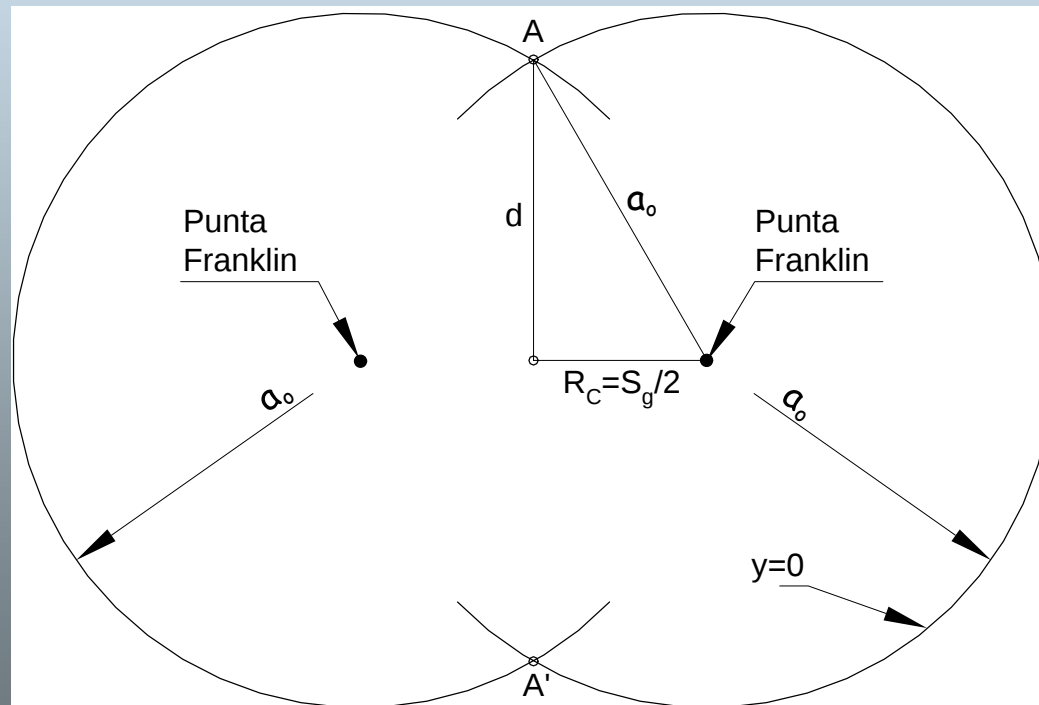
## **Instalación de pantallas**

### **Apantallamiento de subestaciones mediante puntas Franklin**

- Apantallamiento mediante dos puntas
  - El principal problema es el de visualización, ya que requiere una figura 3-dimensional
  - Una porción del espacio es descrita por un radio  $r_s$  a partir de la punta superior de cada mástil
  - Cada porción de esfera termina con la distancia de atracción a tierra  $r_g$
  - Si las puntas están suficientemente próximas, las esferas interseccionarán

## **Instalación de pantallas**

### **Apantallamiento de subestaciones mediante puntas Franklin**



**Vista en planta**

## **Puestas a tierra**

- La puesta a tierra de una instalación eléctrica establece un camino de baja impedancia para la circulación de corriente
- Los objetivos básicos de la puesta a tierra son dos: la seguridad de las personas y la protección de los aparatos e instalaciones
- El conductor o conjunto de conductores que ponen en contacto los equipos de una instalación con tierra se conocen como electrodo o red de tierra
- Conviene distinguir entre puesta a tierra de servicio, que tiene como objetivo conectar a tierra el neutro de un aparato, y puesta a tierra de protección, que tiene como objetivo conectar a tierra las partes metálicas de una instalación que no deben estar bajo tensión

## **Puestas a tierra**

- Una puesta a tierra adecuada
  - Conecta a tierra el neutro de una instalación y establece tierra como potencial de referencia
  - Permite detectar, en caso de falta, la corriente de defecto y facilita la actuación de los sistemas de protección
  - Limita las diferencias de potencial y evita tensiones peligrosas para las personas entre puntos a diferente potencial
  - Proporciona un camino de baja impedancia para las cargas o corriente originadas por el rayo u otros fenómenos eléctricos

## **Puestas a tierra**

- El terreno, que actúa como conductor de la corriente eléctrica en una puesta a tierra, es un agregado formado por una parte sólida mineral y sendas partes líquida y gaseosa
- La corriente que circulará por el terreno dependerá de la resistividad (corrientes de conducción) y de la permittividad (corrientes de desplazamiento) de este terreno
- En el comportamiento de la puesta a tierra predomina el efecto de conducción para intensidades de bajas frecuencias (próximas a la de operación), mientras que es necesario considerar las corrientes de desplazamiento cuando las corrientes son de alta frecuencia (entre 100 kHz y varios MHz)

## **Puestas a tierra**

### **Parámetros físicos del terreno**

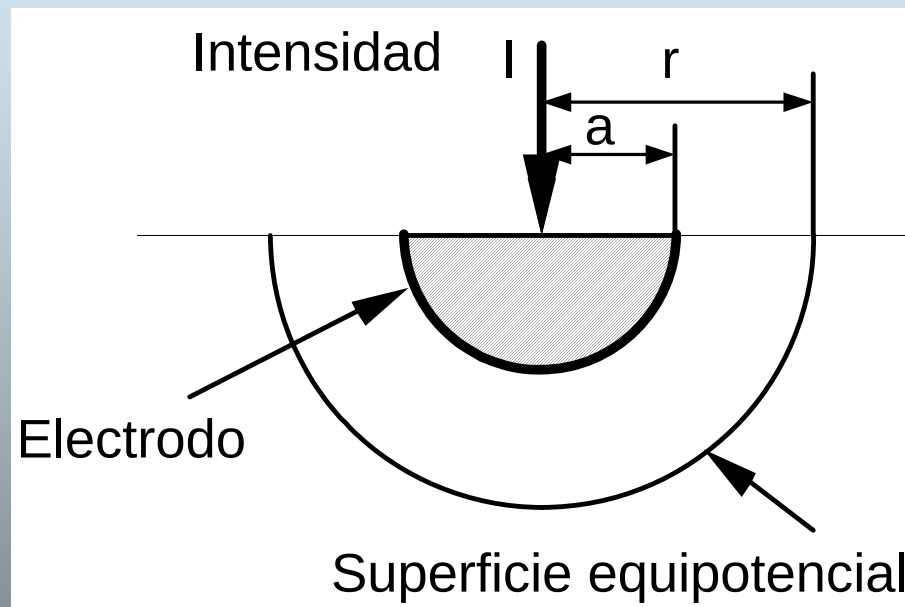
- La resistividad  $\rho$  es básicamente independiente de la frecuencia de la corriente, pero está influida por factores tales como la humedad, la resistividad de los minerales que forman la fracción sólida, la resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la fracción sólida, la porosidad, la salinidad, la superficie de separación de la fase líquida con la fase sólida, la temperatura, o la textura
- La permitividad relativa  $\varepsilon_r$  influye en el fenómeno de dispersión de la corriente eléctrica cuando la frecuencia de la corriente es superior a los 100 kHz

En la mayor parte de los minerales que forman el terreno, la permitividad relativa está entre 3 y 10, llegando raramente a valores de 25

La humedad es un factor importante debido al elevado valor de la permitividad relativa del agua

## Puestas a tierra

Electrodo semiesférico



Resistencia del electrodo

$$R = \frac{\rho}{2\pi a}$$

donde  $a$  es el radio y  $\rho$  la resistividad del terreno

## **Puestas a tierra**

### Comportamiento frente a descargas atmosféricas

- Una instalación de puesta a tierra tiene un comportamiento no lineal y dependiente de la frecuencia
- La respuesta de una instalación de puesta a tierra frente a una descarga atmosférica depende de la intensidad de pico y del frente de onda de la descarga
- La representación de la puesta a tierra como una resistencia cuando la corriente de descarga ha sido provocada por el rayo es una aproximación poco precisa
- Un estudio riguroso debe considerar que los parámetros eléctricos del electrodo o la red de puesta a tierra están distribuidos y tener, por tanto, en cuenta los valores de las impedancias características y de los coeficientes de propagación de las ondas, los acoplamientos electromagnéticos entre los elementos de la red de tierra, la distribución no lineal de las tensiones e intensidades, y la posible ionización del terreno

## **Puestas a tierra**

### Comportamiento frente a descargas atmosféricas

- Cuando la corriente de pico que circula por un electrodo o una red de tierra es muy elevada, la densidad de corriente en zonas próximas a la superficie del electrodo o los conductores de la red de tierra puede ser muy alta, pudiendo alcanzarse valores de campo eléctrico superiores a la rigidez eléctrica del terreno y provocar su *ionización*
- El rango de valores del campo eléctrico crítico para la iniciación del fenómeno de ionización es de 0,2 a 1,7 MV/m, y depende de la resistividad y la humedad del terreno
- El efecto de la ionización es una disminución de la relación entre los valores de pico de la tensión y de la corriente, debido al incremento de la superficie de disipación del electrodo, al ser la conductividad de la zona ionizada mayor que la del terreno
- Esto se traduce en una disminución de la resistencia efectiva de la puesta a tierra

## Puestas a tierra

### Comportamiento frente a descargas atmosféricas

- Cuando la corriente de descarga es de alta frecuencia el efecto de las corrientes de desplazamiento capacitivas (dependientes del producto  $\omega\epsilon$ ) en los componentes de una red de puesta a tierra puede ser muy significativo
- Datos experimentales indican que la relación entre las corrientes conductivas y las capacitivas ( $\sigma/\omega\epsilon$ ), para el rango de frecuencias de las corrientes del rayo, varía entre 0,001 y 0,5
- El comportamiento de los parámetros del terreno ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ ) frente a corrientes de alta frecuencia se puede resumir como sigue:
- la resistividad ( $\rho$ ) decrece aproximadamente a la mitad cuando la frecuencia aumenta de 100 Hz a 2 MHz
- la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) decrece de  $10^5$  a 10 en el mismo rango de frecuencias
- la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) es independiente de la frecuencia y similar a la del aire ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

## Puestas a tierra

### Comportamiento frente a descargas atmosféricas

- Debido a las diferentes velocidades de propagación de las diferentes frecuencias de onda, en un electrodo de gran longitud, las ondas electromagnéticas se propagan perdiendo energía y atenuándose su amplitud, siendo tanto mayor la atenuación y la pérdida de energía, cuanto mayor es la frecuencia
- A lo largo del electrodo, las ondas atenuadas (cresta) y distorsionadas (forma), dan lugar a distribuciones no lineales de tensión y corriente
- Una consecuencia de este comportamiento es que no toda la longitud del electrodo trabaja de la misma manera, ni presenta el mismo comportamiento eléctrico
- La *longitud efectiva* de un electrodo es la longitud por encima de la cual no se obtiene una reducción apreciable de la impedancia del electrodo, debido a que ya no se produce inyección apreciable de corriente en el terreno

## **Técnicas numéricas**

- Pasos a realizar en el cálculo de sobretensiones por ordenador
  - Recogida de datos
  - Selección de la zona a simular del sistema y de los modelos para los componentes involucrados
  - Edición del archivo de entrada
  - Ejecución del caso
  - Interpretación de los resultados
  - Aplicación de los resultados

## **Criterios de selección de modelos**

- Origen del proceso transitorio
  - Rango de frecuencias
- Sistema (componente) a simular
- Información a deducir de la simulación
- Precisión requerida
- Información disponible
- Experiencia!!!

## **Clasificación de frecuencias**

| <b>GRUPO</b> | <b>RANGO DE FRECUENCIA</b> | <b>DESIGNACIÓN</b>                      | <b>TIPO DE TRANSITORIOS</b>            |
|--------------|----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>I</b>     | <b>0.1 Hz - 3 kHz</b>      | <b>Oscilaciones<br/>baja frecuencia</b> | <b>Sobretensiones<br/>temporales</b>   |
| <b>II</b>    | <b>50 Hz - 20 kHz</b>      | <b>Ondas de<br/>frente lento</b>        | <b>Sobretensiones<br/>de maniobra</b>  |
| <b>III</b>   | <b>10 kHz - 3 MHz</b>      | <b>Ondas de<br/>frente rápido</b>       | <b>Sobretensiones<br/>atmosféricas</b> |
| <b>IV</b>    | <b>100 kHz - 50 MHz</b>    | <b>Ondas frente<br/>muy rápido</b>      | <b>Sobretensiones<br/>por cebado</b>   |

## Origen de transitorios

| ORIGEN                                                                        | RANGO DE FRECUENCIAS |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Energización de transformadores                                               | 0.1 Hz - 1 kHz       |
| Ferorresonancia                                                               | 0.1 Hz - 1 kHz       |
| Rechazo de carga                                                              | 0.1 Hz - 3 kHz       |
| Eliminación de cortocircuitos                                                 | 50/60 Hz - 3 kHz     |
| Iniciación de cortocircuitos                                                  | 50/60 Hz - 20 kHz    |
| Energización de líneas                                                        | 50/60 Hz - 20 kHz    |
| Re-energización de líneas                                                     | 50/60 Hz - 20 kHz    |
| Tensión transitoria de restablecimiento                                       |                      |
| * faltas terminales                                                           | 50/60 Hz - 20 kHz    |
| * faltas kilométricas                                                         | 50/60 Hz - 100 kHz   |
| Múltiples recebados de interruptores                                          | 10 kHz - 1 MHz       |
| Sobretensiones por rayos                                                      | 10 kHz - 3 MHz       |
| Cortocircuitos en estaciones receptoras                                       | 10 kHz - 3 MHz       |
| Maniobras con seccionadores y cortocircuitos en receptoras de SF <sub>6</sub> | 100 kHz - 50 MHz     |

## **Criterios de selección de modelos**

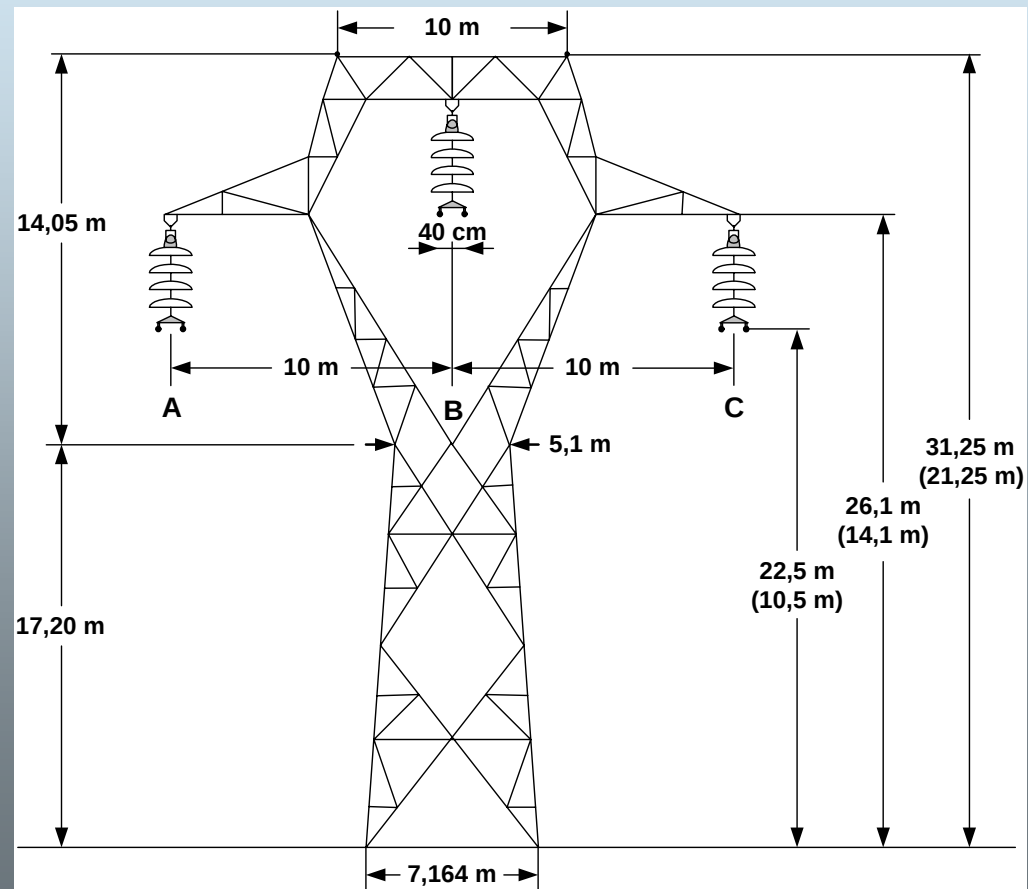
- Datos de entrada
  - Frecuentemente sólo se dispone de valores aproximados, especialmente para transitorios de los Grupos III y IV
- Tipo de estudio
  - En muchos estudios sólo importa el valor máximo durante el transitorio
  - La representación de pérdidas no es siempre crítica, pero casi siempre lo es la de inductancias y capacidades
- Complejidad del sistema
  - Una representación muy detallada necesitará una simulación muy larga
  - Cuantos más componentes tenga la zona escogida más probable es un error o una representación incorrecta
  - Cuanto más elevada sea la frecuencia del transitorio más pequeña será la zona del sistema a representar y más detallada la representación de componentes

## **EMTP** **(ElectroMagnetic Transients Program)**

- Métodos de solución
- Solución transitoria : Esquema de Dommel
  - Regla trapezoidal más método de Bergeron
  - Ecuaciones de nudos
  - Ventajas : simplicidad, estabilidad numérica
  - Limitaciones : paso de integración fijo,
  - Inconvenientes : oscilaciones numéricas
- Cálculo del régimen permanente : Limitaciones
- Sistemas de control
- Modelos con parámetros dependientes de la frecuencia

## Cálculo estadístico de sobretensiones atmosféricas

Línea de 400 kV



## **Cálculo estadístico de sobretensiones atmosféricas**

### **Procedimiento general**

- Se calculan los valores aleatorios
- Se aplica el modelo electrogeométrico para determinar el punto de impacto
- Se calculan las sobretensiones
- Se genera un informe en cada simulación
- El procedimiento se para cuando se alcanza la convergencia del método de Monte Carlo

## Cálculo estadístico de sobretensiones atmosféricas

El modelo electrogeométrico

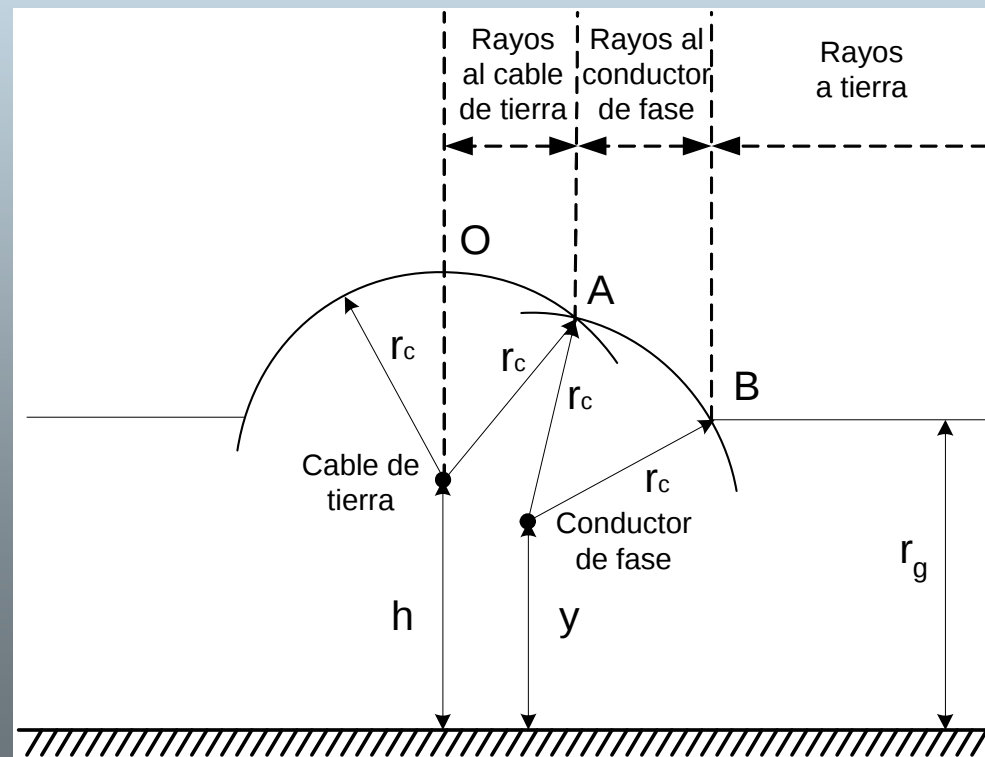
$$r_c = \alpha \cdot I^\gamma$$

$$r_g = \alpha \beta \cdot I^\gamma$$

$$\alpha=10$$

$$\beta=0.36 + 0.17 \cdot \ln(43-y)$$

$$\gamma=0.65$$

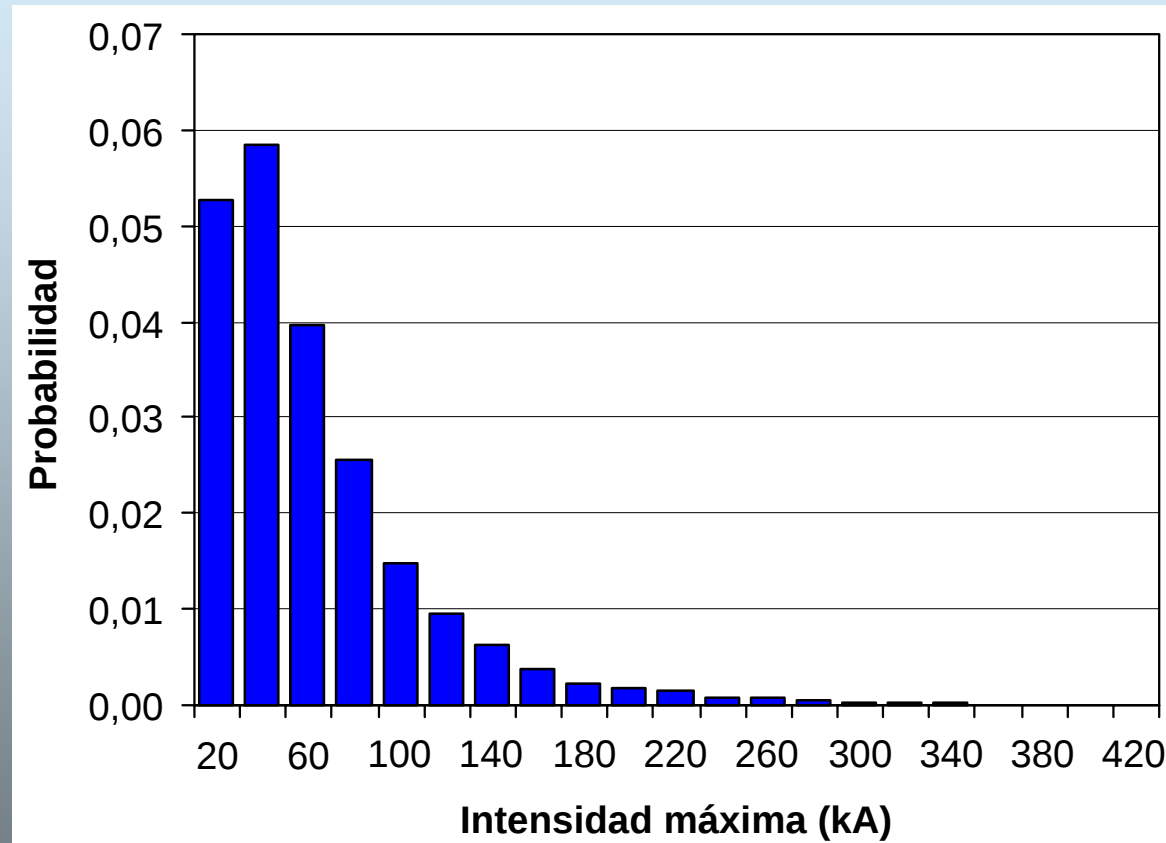


## **Cálculo estadístico de sobretensiones atmosféricas**

### El método de Monte Carlo

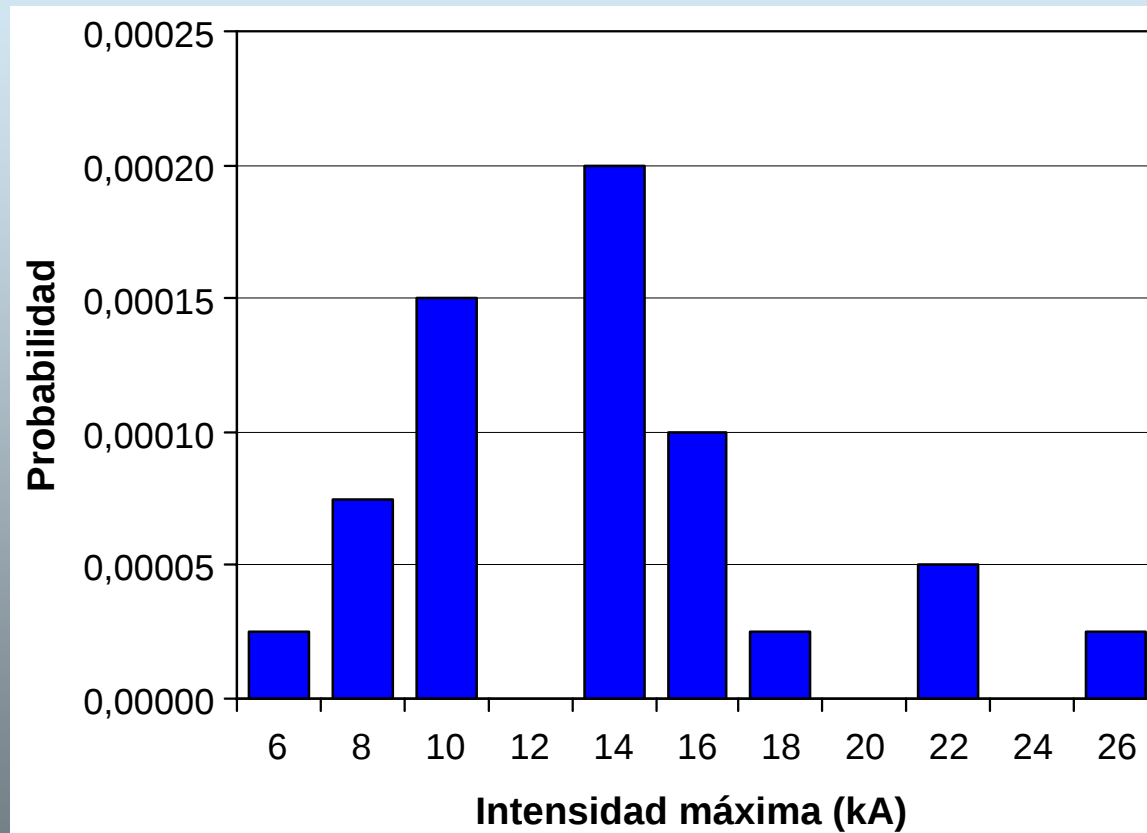
- Distribuciones de probabilidad empleadas
  - amplitud de la corriente máxima : log-normal
    - $I_{med} = 34 \text{ kA}$ ,  $\sigma = 0.74 \text{ kA}$  para descargas negativas
  - tiempo a la cresta : log-normal,  $t_{med} = 2 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $\sigma = 0.494 \text{ } \mu\text{s}$
  - tiempo de cola: log-normal,  $t_{med} = 77.5 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $\sigma = 0.577 \text{ } \mu\text{s}$
  - ángulo de referencia tensiones de fase: uniforme, entre 0 y 360 grados
  - resistencia de tierra : normal,  $R_{med} = 50 \text{ } \Omega$ ,  $\sigma = 5 \text{ } \Omega$   
resistividad del terreno =  $200 \text{ } \Omega\text{-m}$

## Resultados



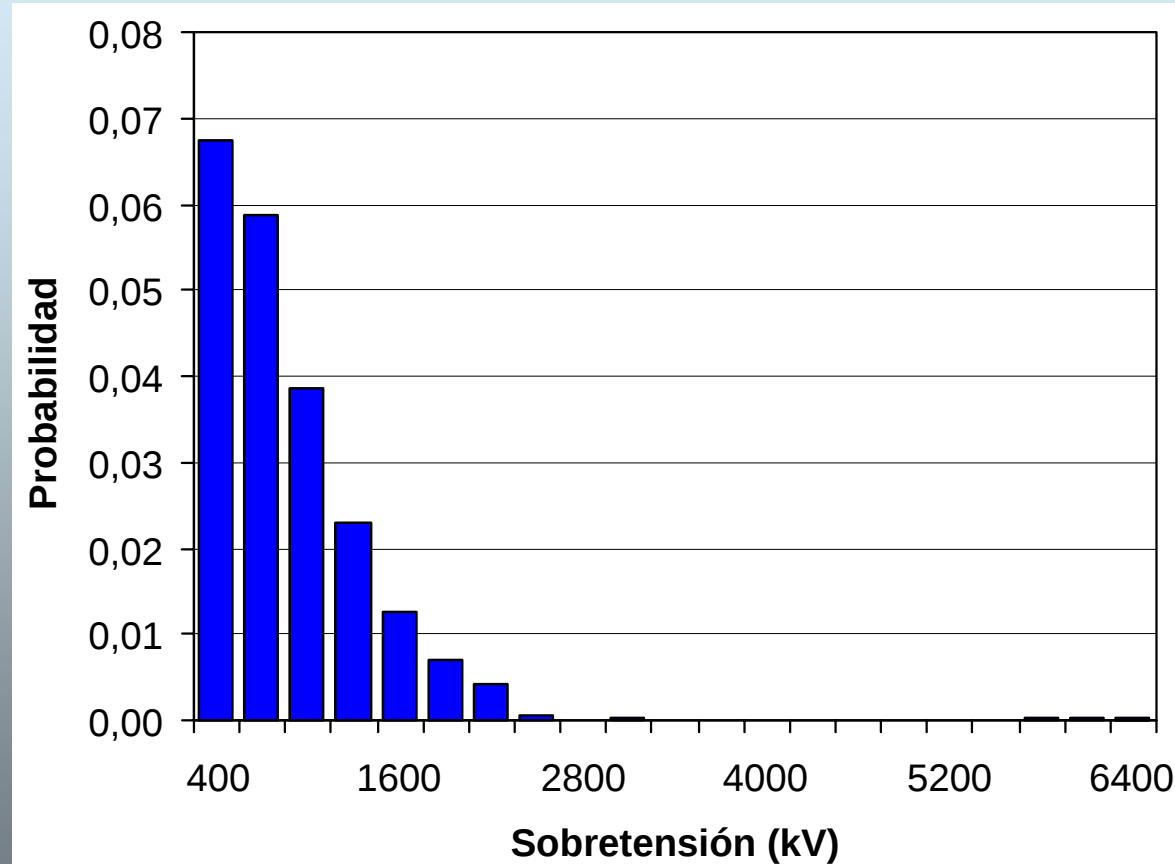
Distribución de las intensidades máximas que impactan en la línea  
Impacto en un cable de tierra

## Resultados



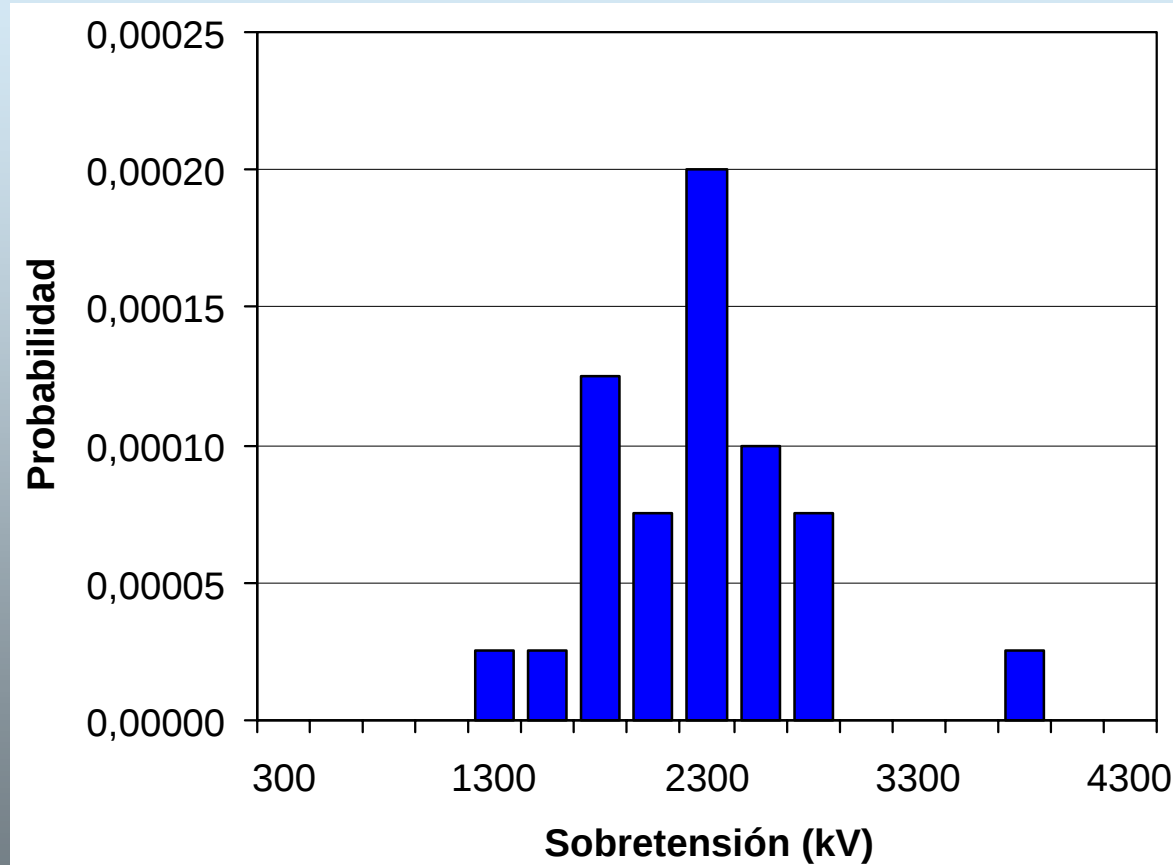
Distribución de las intensidades máximas que impactan en la línea  
Impacto en un conductor de fase

## Resultados



**Distribución de las sobretensiones  
Impacto en un cable de tierra**

## Resultados



**Distribución de las sobretensiones  
Impacto en un cable de tierra**

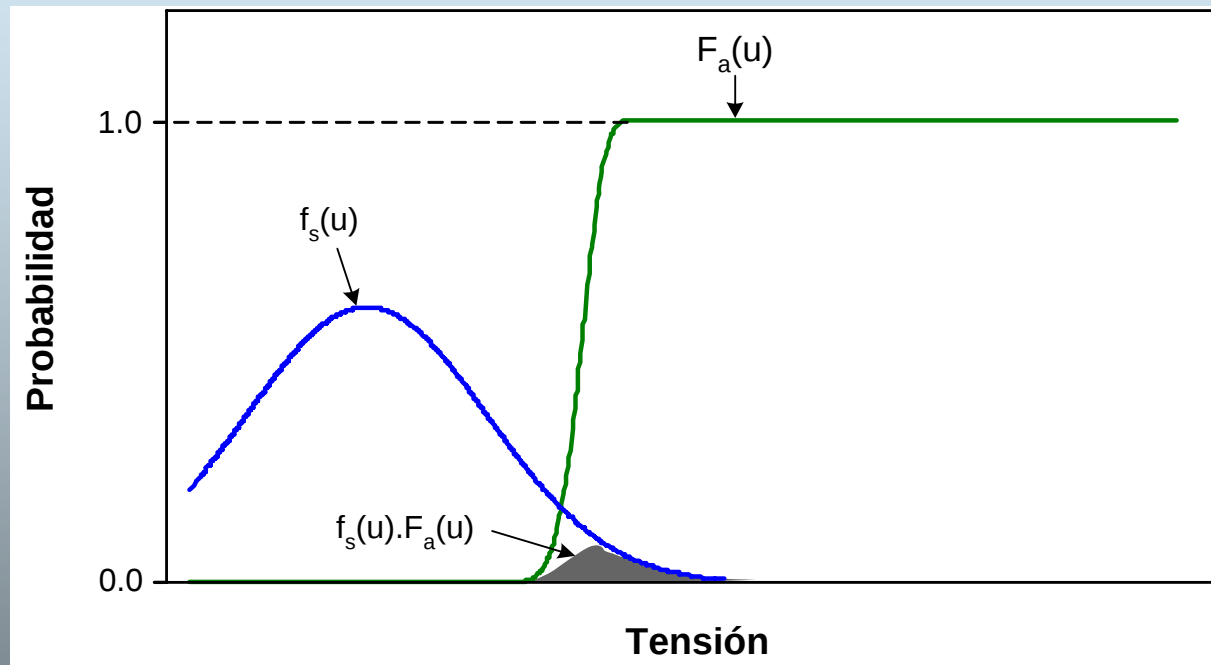
## **Coordinación de aislamiento**

- Se pueden distinguir dos métodos de coordinación de aislamiento: determinista y estadístico
- La aplicación de uno u otro método dependerá de la información disponible sobre el sistema y las tensiones representativas
- El método estadístico se puede aplicar cuando es posible obtener la función de densidad de probabilidad de las sobretensiones representativas
- La distribución estadística de sobretensiones y la función de probabilidad de fallo del aislamiento permiten obtener el riesgo de fallo de un equipo, así como seleccionar y dimensionar el aislamiento de forma que la frecuencia de fallo se halle dentro de los límites aceptables

## **Sobretensiones a considerar**

- Tensiones permanentes
  - Tensión más alta del sistema en régimen permanente
- Sobretensiones temporales
  - Faltas a tierra
  - Pérdida de carga
  - Resonancia y ferorresonancia
- Sobretensiones de frente lento
  - Conexión y reenganche de líneas
  - Faltas y su eliminación
  - Maniobras de corrientes inductivas y capacitivas
- Sobretensiones de frente rápido
  - Caída de rayos sobre líneas
- Sobretensiones de frente muy rápido
  - Maniobras de seccionadores
  - Defectos en GIS

## Cálculo del riesgo de fallo

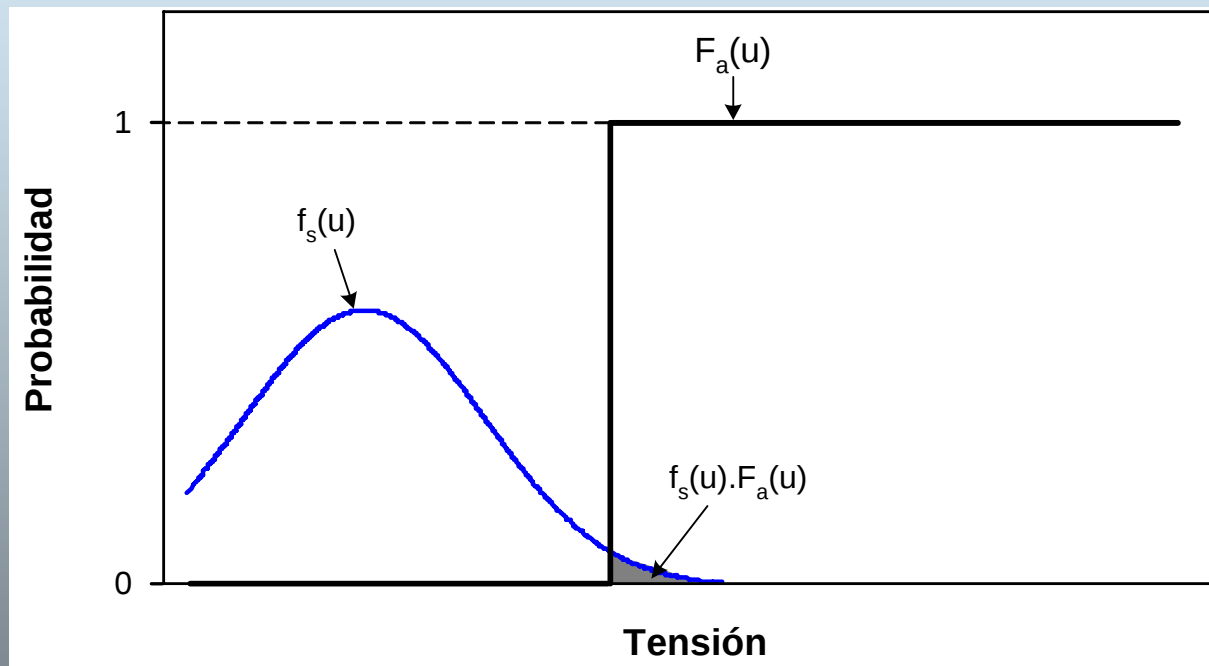


$$R = \int_0^{\infty} f_s(U) \cdot F_a(U) \cdot dU$$

$f_s(u)$  es la función de densidad de probabilidad de las sobretensiones

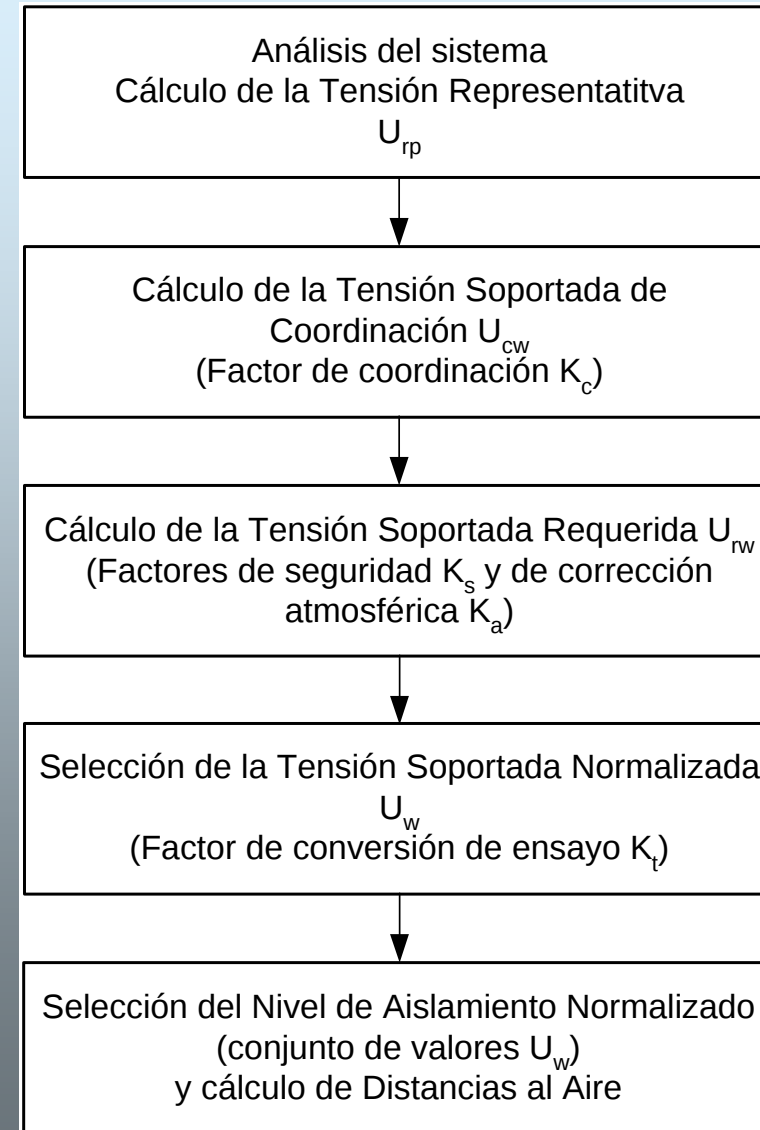
$F_a(u)$  es la función de distribución acumulada del aislamiento

## Cálculo del riesgo de fallo



**Aislamiento no autorregenerable**

## Procedimiento de coordinación de aislamiento UNE-EN 60071



## **Procedimiento de coordinación de aislamiento (UNE-EN 60071)**

1. Estimación de la *tensión representativa* en los equipos o en la instalación a diseñar, teniendo en cuenta los niveles de protección proporcionados por los dispositivos de protección instalados y el valor máximo de la tensión de operación:
  - para instalaciones de gama I se analizan las sobretensiones temporales y las de origen atmosférico,
  - para instalaciones de gama II se analizan las sobretensiones de frente lento y las de origen atmosférico

## **Procedimiento de coordinación de aislamiento (UNE-EN 60071)**

2. Se determina la *tensión soportada de coordinación*, que es la tensión soportada que cumple los criterios de diseño en las condiciones de servicio en que funcionarán los equipos o la instalación
  - Esta tensión se basa en el riesgo de fallo aceptado, y su cálculo se realizará multiplicando la tensión representativa por el *factor de coordinación*,  $K_c$ , que depende del tipo de aislamiento y del método de coordinación de aislamiento (determinista, estadístico) que es posible aplicar

## **Procedimiento de coordinación de aislamiento (UNE-EN 60071)**

3. La tensión soportada de coordinación se convierte en la *tensión soportada especificada*, que es la tensión normalizada de ensayo que el aislamiento debe soportar para asegurar el criterio de diseño
  - La tensión soportada especificada se obtiene multiplicando la tensión soportada de coordinación por un *factor de seguridad*,  $K_s$ , que compensa las diferencias entre las condiciones reales de servicio y las de ensayo
  - En aislamientos externos también se aplicará un *factor de corrección atmosférico*,  $K_a$ , que tenga en cuenta las diferencias entre las condiciones ambientales de servicio y las normalizadas de ensayo

## **Procedimiento de coordinación de aislamiento (UNE-EN 60071)**

4. Se selecciona el conjunto de *tensiones soportadas normalizadas* que satisfacen las tensiones soportadas especificadas
  - La tensión soportada normalizada es la tensión aplicada en un ensayo de tensión normalizado
  - La tensión soportada normalizada puede elegirse para la misma forma de onda normalizada que la tensión soportada especificada o para una forma de onda distinta mediante la aplicación del *factor de conversión de ensayo*,  $K_t$

## **Procedimiento de coordinación de aislamiento (UNE-EN 60071)**

5. Se selecciona el *nivel de aislamiento normalizado*, es decir el nivel de aislamiento asignado cuyas tensiones soportadas normalizadas están asociadas a la tensión de operación más elevada según la clasificación de la CEI

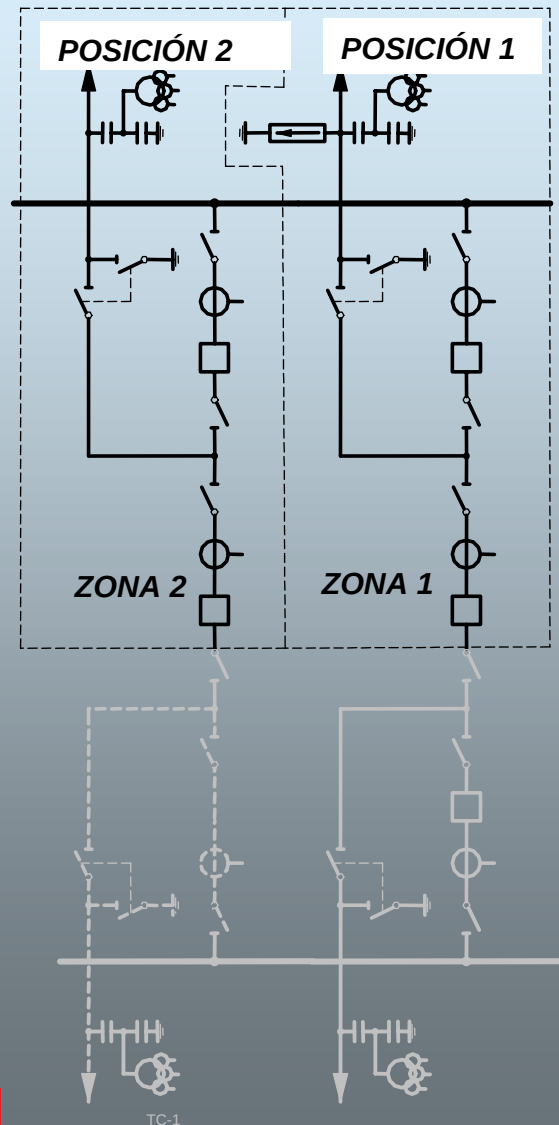
# Casos prácticos: Estudios de coordinación de aislamiento gama II

(Tensión más elevada para el material  $U_m > 245$  kV)

- Selección del aislamiento en una subestación de 400 kV
- Comprobación del aislamiento en una línea de 400 kV

## Criterios generales:

- Objetivo: sistematización y automatización de los estudios de coordinación de aislamiento
- Método de cálculo matricial exhaustivo, considerando la normativa vigente de coordinación de aislamiento. 31 matrices de cálculo, 7 resultados
- Introducción del concepto **zona de coordinación**: conjunto de puntos en los que interesa evaluar el comportamiento del aislamiento. Pueden ser diferentes para cada uno de los tipos de sobretensiones, y permiten relacionar los estudios de sobretensiones con los de coordinación de aislamiento



## Selección de aislamiento en subestación de 400 kV

- Primero se definen las **zonas de coordinación** consideradas en el estudio
- A continuación se recopilan todos los datos de entrada:
  - Datos de la instalación: nivel de contaminación, altitud y tensión máxima de servicio
  - Datos de sobretensiones, para cada zona de coordinación definida

| Sobretensión  | Matriz |
|---------------|--------|
| Temporales    | ST     |
| Frente lento  | SFL    |
| Frente rápido | SFR    |

- El siguiente paso consiste en el cálculo de las *sobretensiones representativas* en la subestación

| Sobretensión                                          | Matriz           |
|-------------------------------------------------------|------------------|
| Tensión de servicio continuo                          | U_rp_sc          |
| Temporales                                            | ST_rp            |
| Frente lento fase-tierra                              | SFL_rp_ft        |
| Frente lento fase-fase, aislamiento interno y externo | SFL_rp_ff_ai, ae |
| Frente rápido equipos protegidos                      | SFR_rp_p         |
| Frente rápido equipos no protegidos                   | SFR_rp_np        |

- A continuación se calculan las *tensiones soportadas de coordinación*, tomando las sobretensiones representativas máximas de la fase anterior, y aplicando el factor de coordinación  $K_{cd}$  definido en la normativa

| Sobretensión                                          | Matriz           |
|-------------------------------------------------------|------------------|
| Tensión de servicio continuo                          | U_cw_sc          |
| Temporales                                            | ST_cw            |
| Frente lento fase-tierra                              | SFL_cw_ft        |
| Frente lento fase-fase, aislamiento interno y externo | SFL_cw_ff_ai, ae |
| Frente rápido equipos protegidos                      | SFR_cw_p         |
| Frente rápido equipos no protegidos                   | SFR_cw_np        |

- A continuación se calculan las *tensiones soportadas específicas*, aplicando para ello los factores  $K_a$  (corrección por altitud) y  $K_s$  (factor de seguridad), a las tensiones soportadas de coordinación. El objetivo es que la tensión soportada de coordinación se mantenga durante toda la vida útil del material

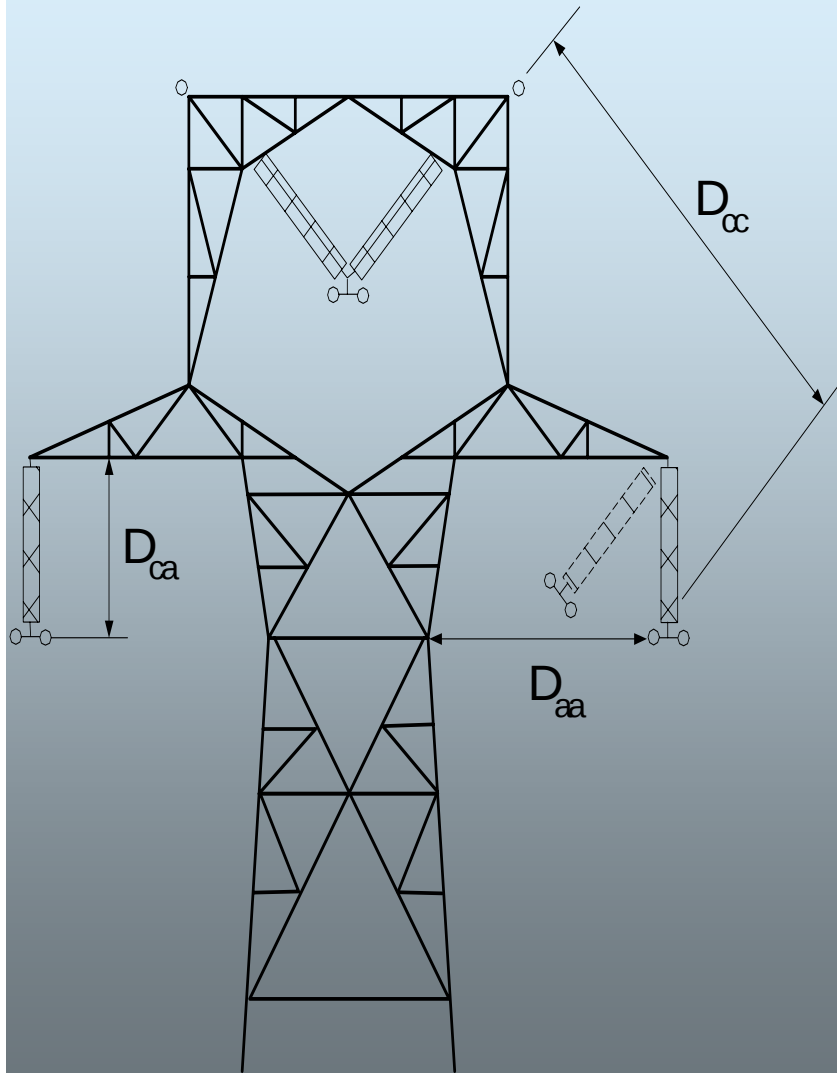
| Sobretensión                                          | Matriz           |
|-------------------------------------------------------|------------------|
| Tensión de servicio continuo                          | U_rw_sc          |
| Temporales, aislamiento interno y externo             | ST_rw_ai, ae     |
| Frente lento fase-tierra, aislamiento interno y ext.  | SFL_rw_ft_ai, ae |
| Frente lento fase-fase, aislamiento interno y externo | SFL_rw_ff_ai, ae |
| Frente rápido equipos protegidos, aislam. int, y ext. | SFR_rw_p_ai, ae  |
| Frente rápido equipos no proteg, aislam. int, y ext.  | SFR_rw_np_ai, ae |

- Para aislamiento de la gama II ( $U_m > 245$  kV), la norma establece únicamente dos tipos de tensiones soportadas normalizadas:
  - Tensión soportada a los impulsos tipo maniobra
  - Tensión soportada a los impulsos tipo rayo
- Por ello es preciso convertir las tensiones soportadas especificadas temporales en tensiones soportadas especificadas de frente lento, aplicando los factores de conversión de ensayo definidos en la normativa
- Para proceder con la siguiente etapa del proceso de cálculo, se seleccionarán como tensiones soportadas especificadas de frente lento las mayores entre:
  - Las tensiones soportadas especificadas temporales convertidas a sobretensiones de frente lento mediante aplicación de factores de conversión de ensayo
  - Las tensiones soportadas especificadas de frente lento, calculadas en la etapa anterior

- La última etapa del proceso es la elección de tensiones soportadas normalizadas
- Para ello, se seleccionan las tensiones soportadas normalizadas iguales o superiores a las tensiones soportadas especificadas
- El resultado final del procedimiento son siete tensiones soportadas normalizadas que definen las características adecuadas del aislamiento que se debe instalar en la subestación, en lo que se refiere al comportamiento frente a sobretensiones

| Servicio continuo<br>kV eficaces | Impulso tipo maniobra<br>kV cresta |             |                     |             | Impulso tipo rayo<br>kV cresta |                     |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------|---------------------|-------------|--------------------------------|---------------------|
|                                  | Aislamiento interno                |             | Aislamiento externo |             | Aislamiento interno            | Aislamiento externo |
| fase - fase                      | fase - tierra                      | fase - fase | fase - tierra       | fase - fase | fase - tierra                  | fase - tierra       |
| 420                              | 950                                | 1425        | 850                 | 1360        | 1300                           | 1175                |

## Comprobación del aislamiento de una línea aérea de 400 kV



- En líneas aéreas, no son aplicables las tensiones soportadas normalizadas, se calculan únicamente las tensiones soportadas especificadas
- Es preciso considerar el desplazamiento lateral de las cadenas de aisladores en suspensión, para validar la rigidez dieléctrica de las distancias resultantes en el aire
- El resto del procedimiento es idéntico al empleado en el caso de subestaciones

- Las tensiones soportadas especificadas se calculan por los mismos procedimientos que se han empleado en el caso de subestaciones
- A continuación es preciso garantizar que las distancias en el aire son adecuadas para las tensiones soportadas especificadas calculadas
- La norma europea EN 50341-1 incluye expresiones empíricas para estimar las distancias en el aire mínimas en dos casos:
  - Para tensión de servicio continuo
  - Para sobretensiones de frente lento o de frente rápido
- En este ejemplo las distancias mínimas están condicionadas por las sobretensiones de frente lento, que obligan a elegir distancias mayores que las necesarias para soportar la tensión de servicio continuo y las de frente rápido

- Aplicando el procedimiento descrito en la normativa, las distancias en el aire calculadas y reales obtenidas en el ejemplo son, en m:

|                                               | Calculada | Real |
|-----------------------------------------------|-----------|------|
| Distancia conductor exterior-apoyo sin viento | 2.42      | 3.20 |
| Distancia conductor exterior-apoyo con viento | 2.42      | 2.47 |
| Distancia conductor ventana-apoyo             | 2.60      | 3.20 |
| Distancia conductor-conductor                 | 3.97      | 9.70 |
| Número de elementos de las cadenas            | 18        | 22   |

- A la vista de estos resultados se puede concluir que el aislamiento de la línea analizada es adecuado desde el punto de vista de coordinación de aislamiento