



# COORDINACIÓN DE AISLACIÓN DE LÍNEAS A LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

## **PLAN DE LA PRESENTACIÓN**

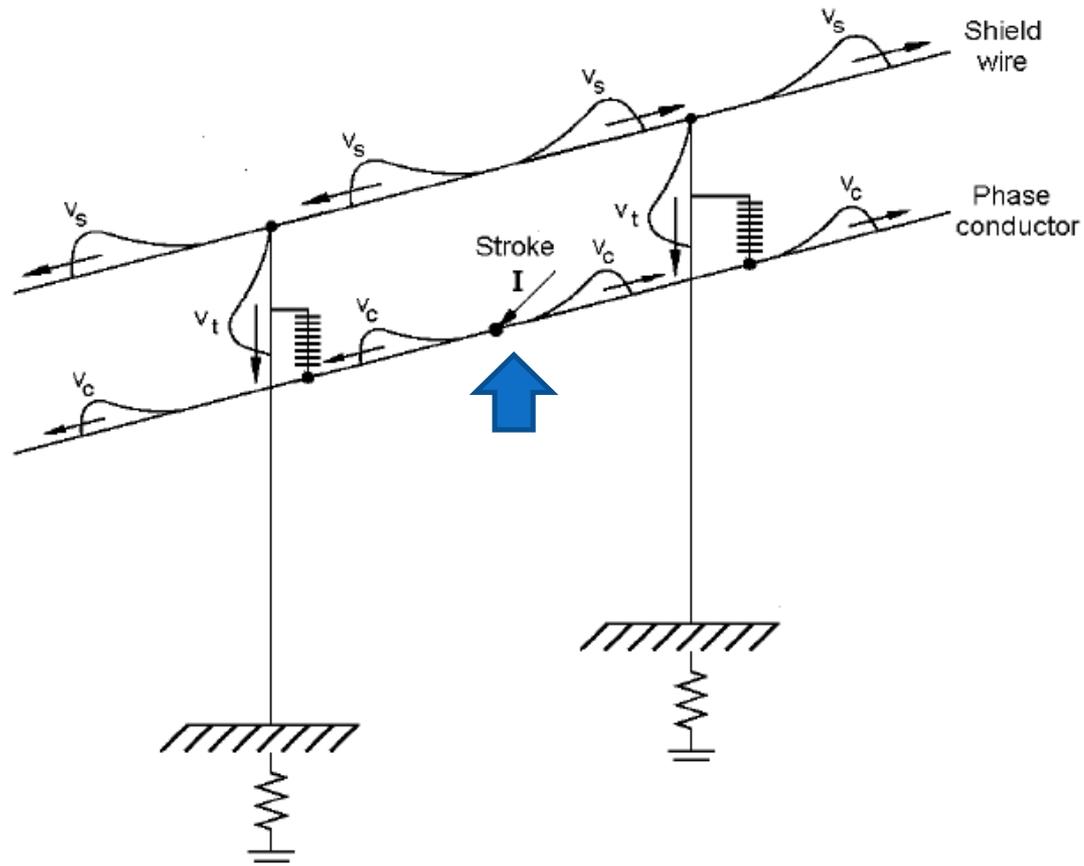
- ✓ INTRODUCCIÓN**
- ✓ PARÁMETROS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**
- ✓ ELEMENTOS DEL CIRCUITO**
- ✓ CÁLCULO DE DESCARGAS INVERSAS**
- ✓ CÁLCULO DE DESCARGAS DIRECTAS**
- ✓ MODELO ATP**

# **INTRODUCCION**

## **Aspectos resaltables de las sobretensiones de rayo (STR)**

- ✓ **De origen externo y naturaleza aleatoria**
- ✓ **Se producen tanto por descarga directa (impacto en conductor de fase) como por descarga inversa (impacto en torre o cable de guardia).**
- ✓ **Las sobretensiones pueden alcanzar valores extremadamente altos, del orden de los MV**

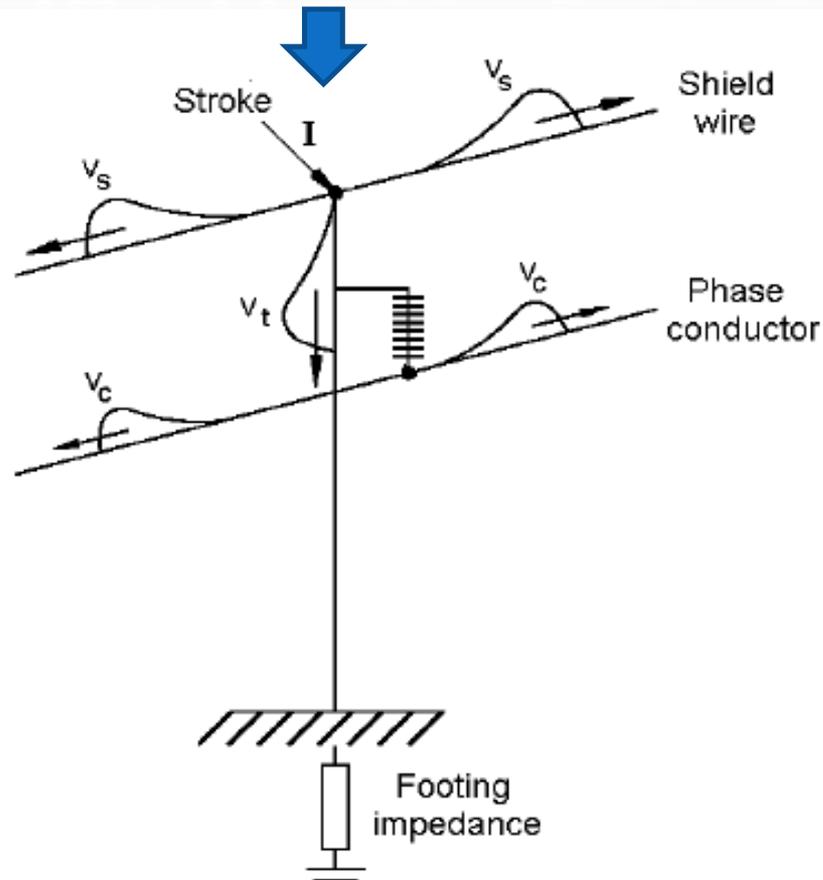
# Descarga directa



b) Shielding failure

Fig. 1. Lightning stroke to a transmission line.

# Descarga inversa



a) Stroke to a tower

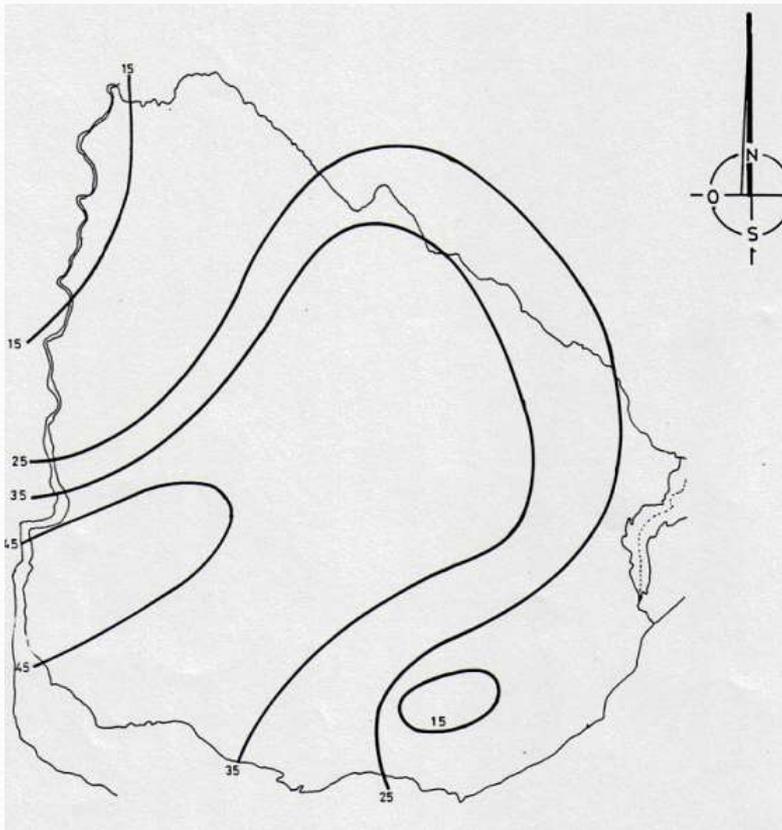
## **Metodología de cálculo de la tasa de falla**

- ✓ **Modelar los parámetros relevantes de la descarga atmosférica**
- ✓ **Modelar los circuitos eléctricos en que incide la descarga y calcular las correspondientes sobretensiones aplicadas a las aislaciones**
- ✓ **Evaluar la soportabilidad de las aislaciones**
- ✓ **Tasas de falla razonables en Uruguay: hasta 5/100 km-año para líneas de 150 kV y 0,5/100km-año para líneas de 500 kV.**

# PARAMETROS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

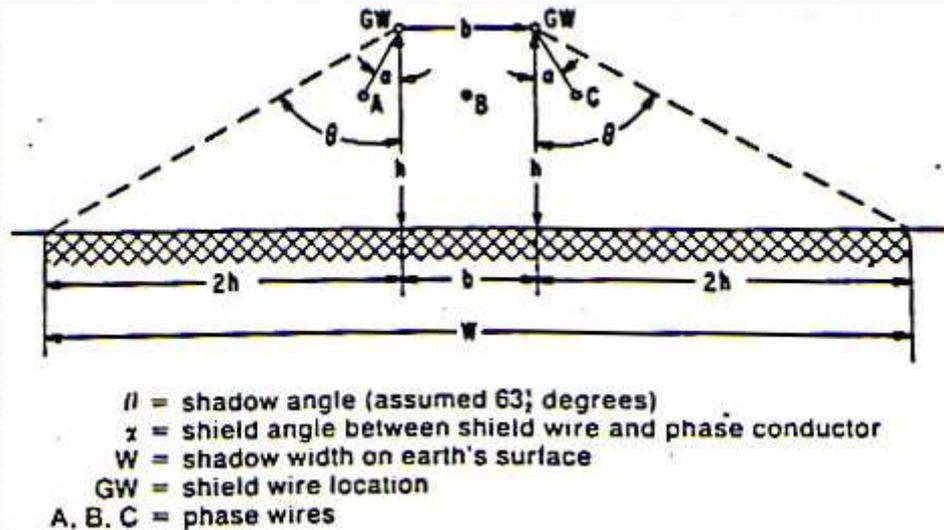
## Nivel ceráunico y número de rayos que inciden en la línea

Dato de partida: nivel ceráunico T de la zona = número de días promedio al año en que se escuchan truenos en esa zona  $\Rightarrow$  curvas isoceráunicas



**Número total de rayos por km<sup>2</sup>-año :  $N=0,04 T^{1,25}$  .**

**De los rayos que inciden en la zona de la línea ,ésta interceptará una cantidad proporcional a la “sombra” que ejerce sobre el terreno**



**Número de rayos que inciden en la línea por 100 km y por año:**

$$N_L = 0,004 \cdot T^{1,25} \cdot (b + 28 \cdot h^{0,6})$$

**b : Ancho de la línea (m) (es 0 si hay un solo cable de guardia)**

**h : Altura del cable de guardia en la torre.**

**T : Nivel cerámico**

## Clasificación de los $N_L$ rayos que impactan la línea:

Directamente sobre los conductores de fase (descarga directa), y provocando falta (falla de blindaje) =  $N_S$  rayos

Sobre las torres o cables de guardia (eventual descarga inversa) o sobre los conductores de fase sin provocar falta =  $N_L - N_S$  rayos

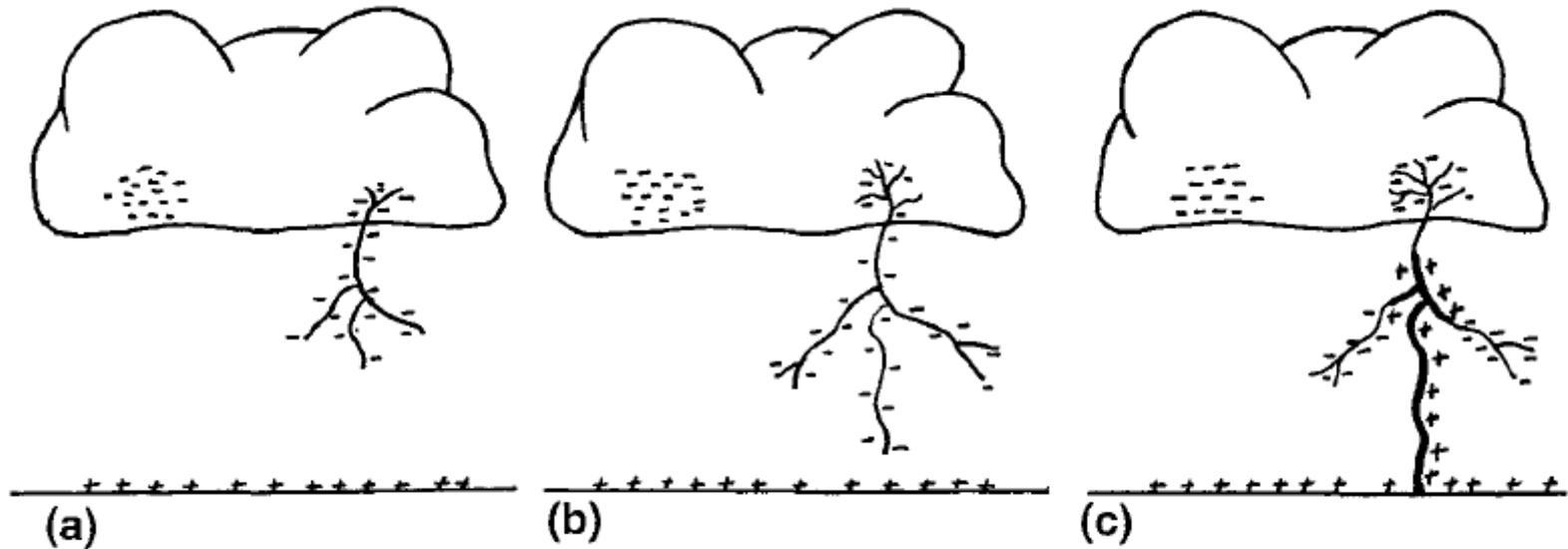
### Hipótesis habituales:

-No se producen descargas inversas en la distancia de aislación en el vano, sino sólo en las aislaciones en la torre.

-60 % de las descargas que no producen falla de blindaje pueden provocar descarga inversa, y sólo a través de la aislación en la torre.

Se consideran por lo tanto sólo  $N_T = 0,6.(N_L - N_S)$  rayos para calcular la tasa de falla a las descargas inversas, y se asume que esos rayos caen todos en la torre.

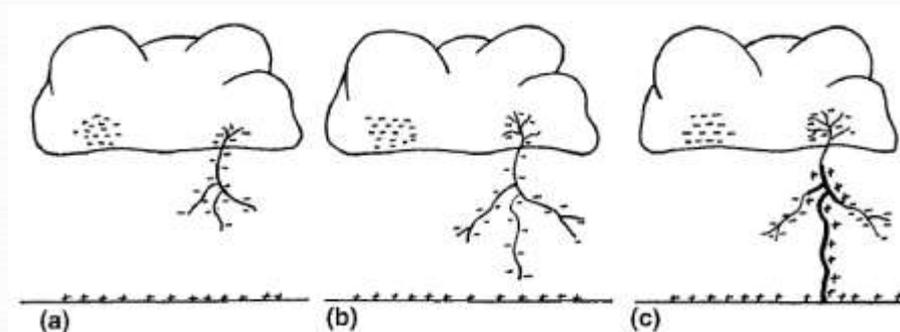
## Mecanismos físicos de la descarga: primer descarga



**Figure 2** The first stroke. (a) Stepped leader starts. (b) Stepped leader reaches ground. (c) Upward channel moves toward cloud.

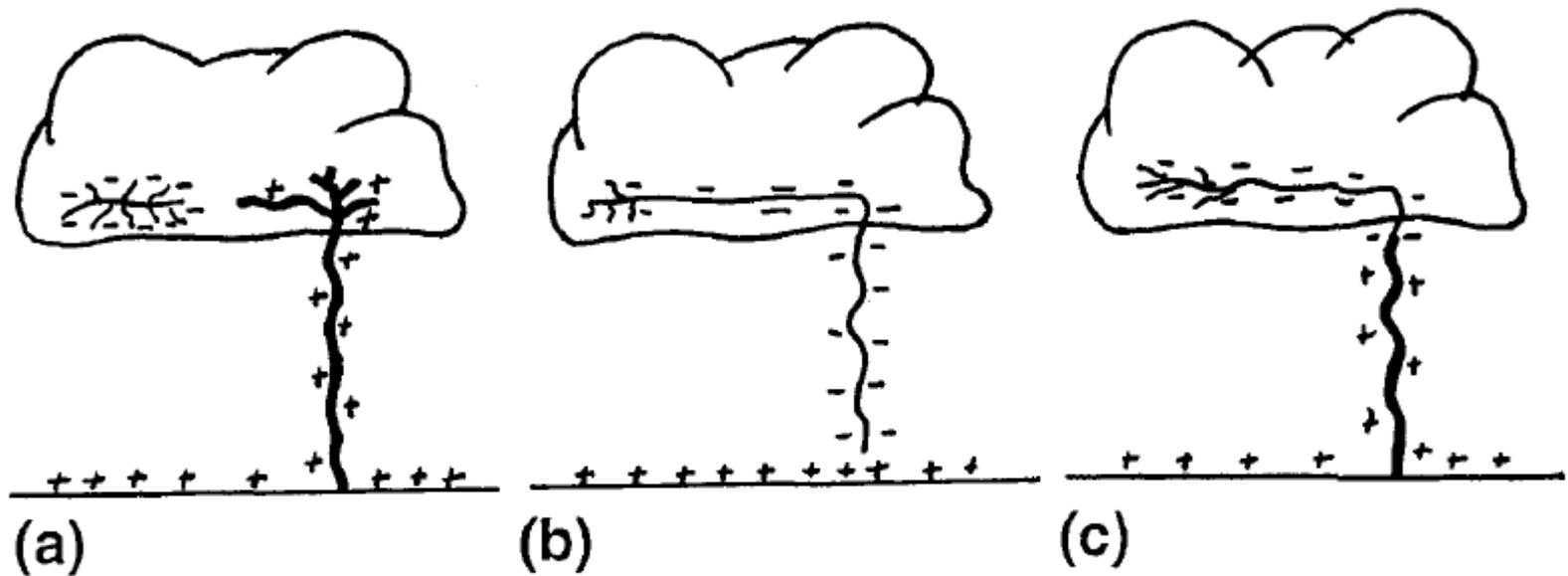
## Mecanismos físicos de la descarga: primer descarga

- ✓ Descarga “líder”, con valores reducidos de corriente (100 A, p.ej) que se va moviendo en forma aleatoria por el aire en “saltos” lentos (0,05 % de la velocidad de la luz) de 80 a 100 m.
- ✓ “Salto” final cuando el líder se acerca a una distancia adecuada (“striking distance”) del objeto al cuál descargará
- ✓ Descarga rápida (10 % de la velocidad de la luz) “de retorno” desde tierra hacia la nube a través del camino ionizado, con corriente de descarga de decenas de kA. Esta descarga de alto valor de corriente es, propiamente, la que interesa a los efectos del diseño de aislación.



## Mecanismos físicos de la descarga: descargas subsecuentes

- ✓ Descargas sucesivas (promedio: 3 descargas por rayo) de menor valor de corriente



**Figure 3** A second stroke. (a) Upward channel of first stroke reaches cloud. (b) Dart leader progresses to ground. (c) Upward channel begins.

## Distribución de probabilidad del pico de corriente de la descarga

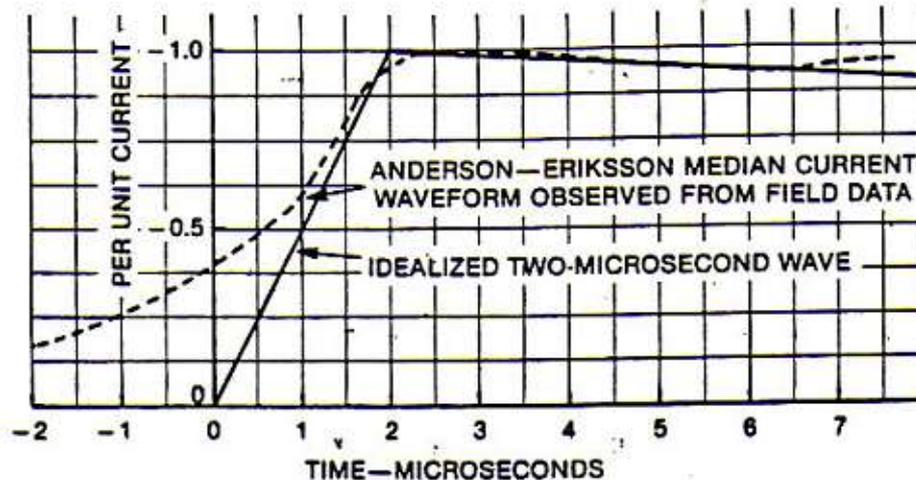
Probabilidad de que el valor de pico  $I$  (en kA) sea excedido:

$$P_i = 1/(1+(I/31)^{2,6})$$

$2 \leq I \leq 200$  kAp , polaridad negativa (85 % de los casos)

Forma de onda: es también una variable aleatoria

Hipótesis simplificatoria: la onda de corriente tiene una forma definida por 2 rectas, con tiempo de frente  $2 \mu\text{s}$  y alcanzando la mitad del pico en  $50 \mu\text{s}$  luego del pico.



## Modelo doble rampa

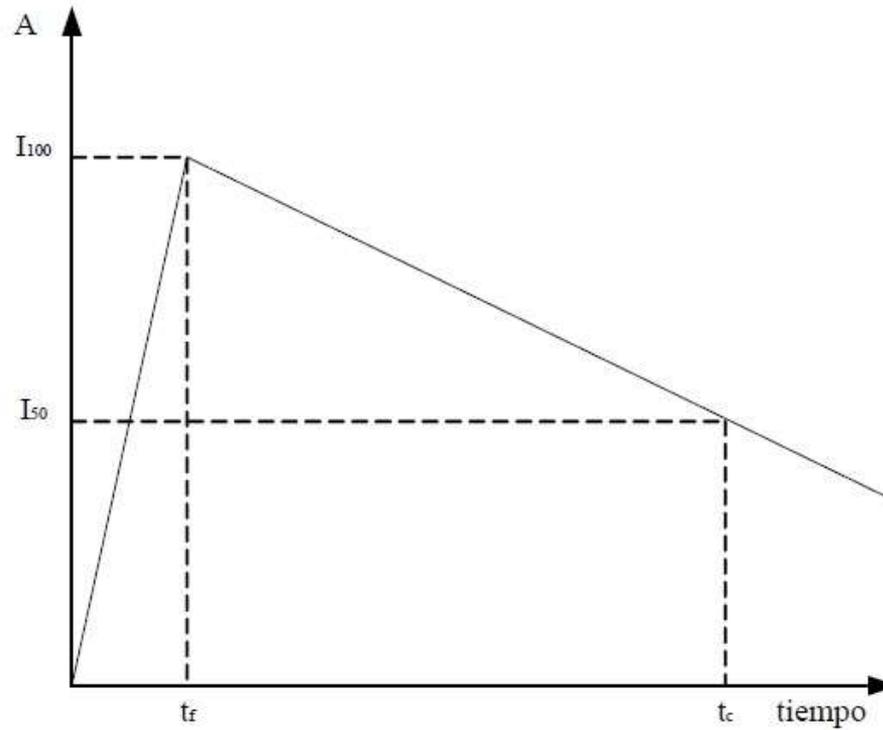


Figura 2. Forma de onda en doble rampa.

## Modelos cóncavos (Heidler, CIGRE, etc.)

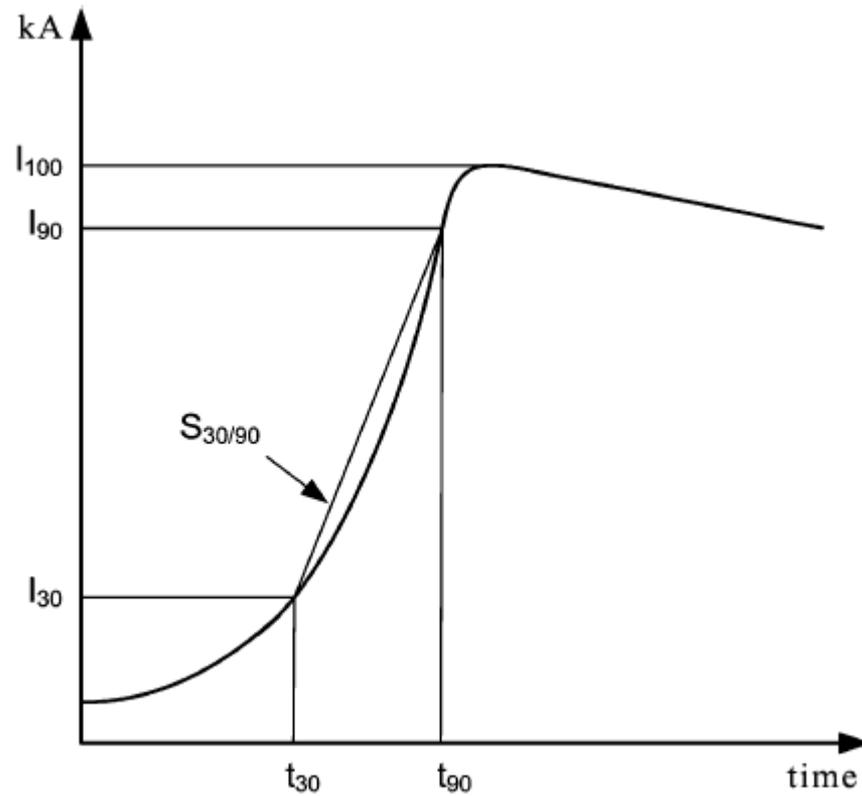


Fig. 2. Parameters of a return stroke-concave waveform.

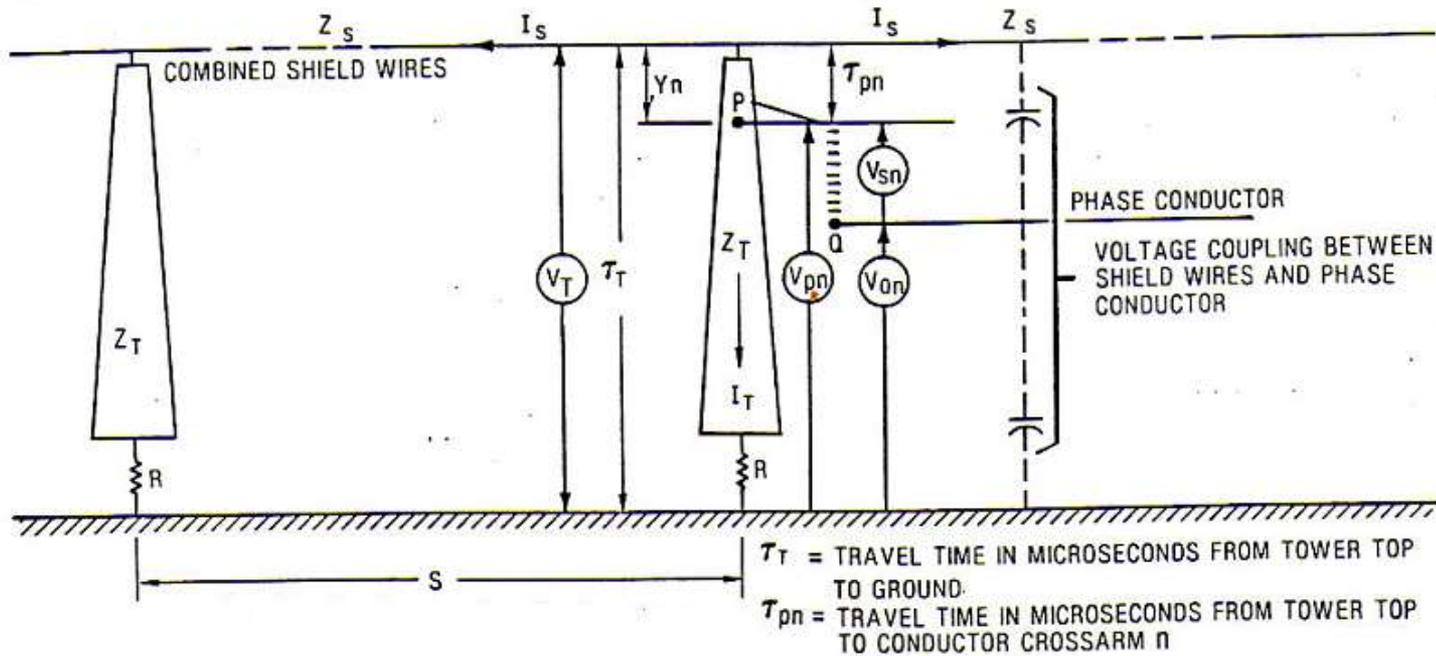
## **Parámetros aleatorios del rayo** **(para simulaciones estadísticas)**

- ✓ Pico de corriente
- ✓ Forma de onda (tiempo de frente, cola)
- ✓ Punto de impacto (torre/cable de guardia, fase, tierra)

## **Número de descargas**

- ✓ **Las descargas subsecuentes suelen ser de tiempos de cresta más cortos y valores de pico más bajos.**
- ✓ **Ambos factores tienden a bajar la probabilidad de contorneo a través de las cadenas de aisladores (los aisladores tienen más soportabilidad en zonas de tiempo de frente muy bajo), por lo que se suele realizar el análisis suponiendo una única descarga (la primera).**

# ELEMENTOS DEL CIRCUITO



## Impedancia de onda propia de los conductores y cable de guardia:

$$Z_{nn} = 60 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{2.h}{r}\right) \cdot \ln\left(\frac{2.h}{R'}\right)} \quad (\text{ohms})$$

**h=altura promedio (m)**

**r= radio del subconductor (m)**

**$R'=r$  para conductor único**

**$R'=r+R_{eq}$  para haz de subconductores**

**$R_{eq}$ =radio equivalente del haz**

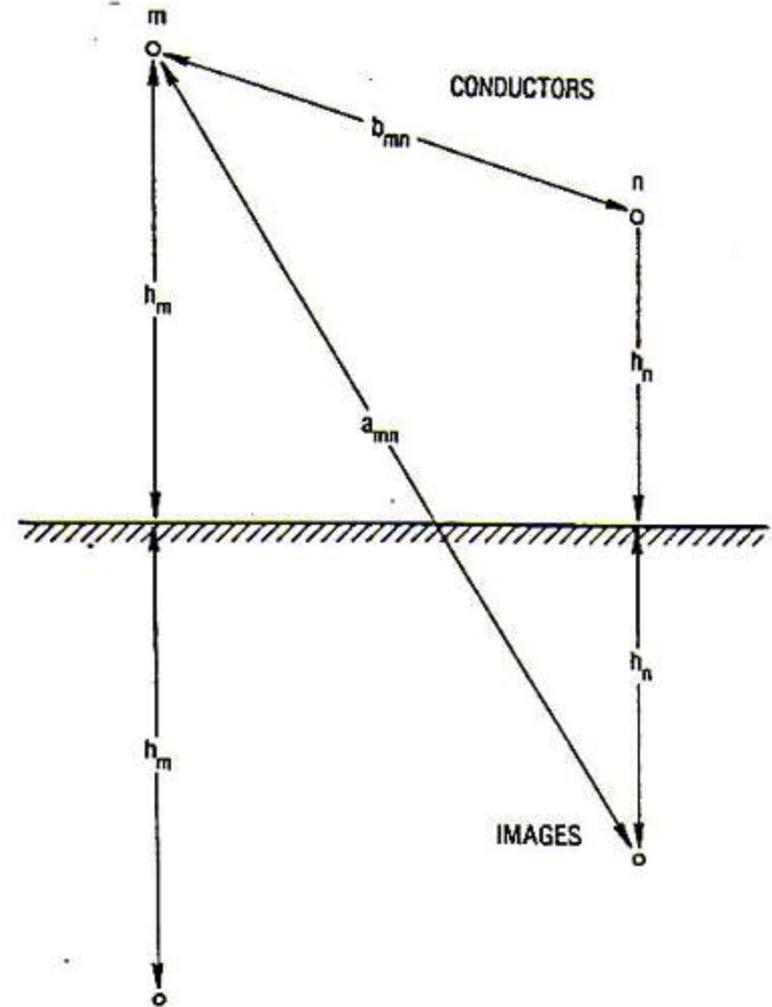
**(Ver en los apuntes el cálculo de  $R_{eq}$  y las correcciones por efecto corona)**

## Coeficiente de acoplamiento entre 2 conductores "m" y "n"

$$K_{mn} = Z_{mn} / Z_{nn}$$

$Z_{mn} = 60 \ln (a_{mn} / b_{mn})$  impedancia de onda mutua ( $a_{mn}$  es la distancia del conductor m a la imagen del n ,y  $b_{mn}$  la distancia entre los conductores).

$Z_{nn}$  =impedancia de onda propia.

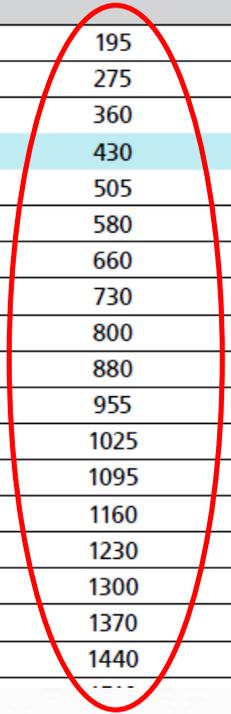


# Cadenas de aisladores

✓ **Modelo simplificado: la cadena contornea a una tensión fija (CFO) dada por el fabricante en base a ensayos para ondas de rayo normalizadas**

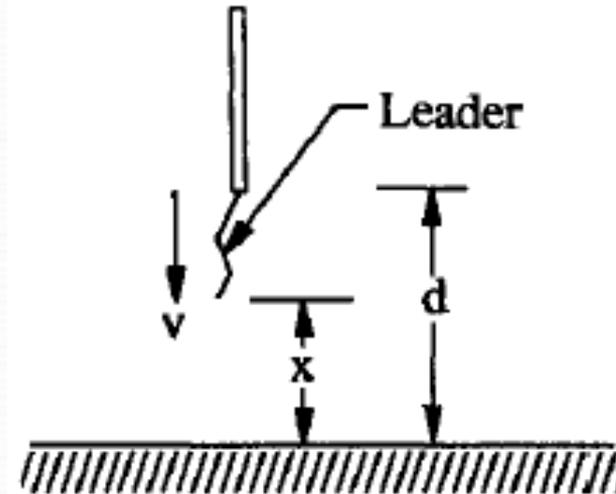
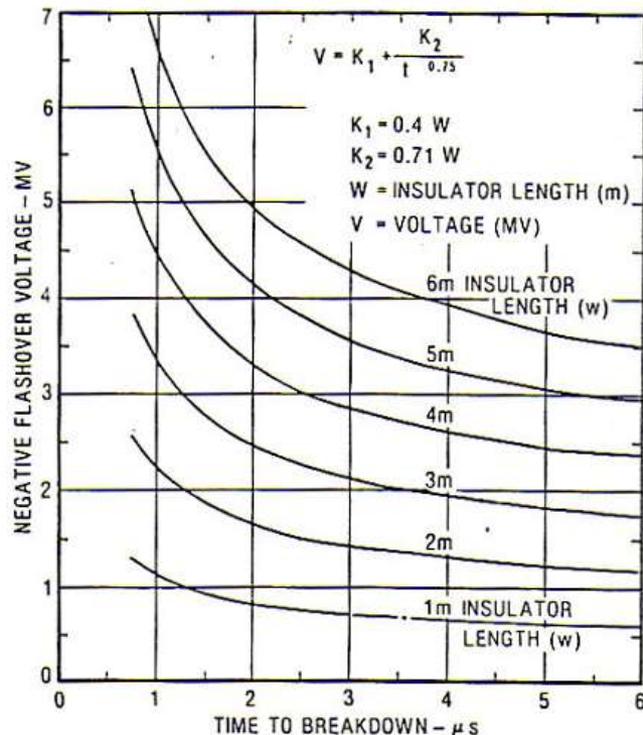


| Catalog N°            | Diameter / Spacing<br>Ø 255/127              |     |  | Diameter / Spacing<br>Ø 255/146 - Ø 280/146  |     |  |
|-----------------------|--|-----|--|--|-----|--|
|                       | F70/127 - F100/127 - F12/127                 |     | Lightning impulse<br>withstand voltage<br>(kV) | F70/146 - F100/146 - F12/146 - F160/146      |     | Lightning impulse<br>withstand voltage<br>(kV) |
|                       | Power frequency<br>withstand voltage<br>(kV) |     |  | Power frequency<br>withstand voltage<br>(kV) |     |  |
| Number<br>of<br>units | DRY  | WET | DRY  | WET  |     |  |
| 2                     | 113  | 65  | 175  | 130  | 75  | 195  |
| 3                     | 157  | 100 | 245  | 180  | 115 | 275  |
| 4                     | 204  | 135 | 320  | 235  | 155 | 360  |
| 5                     | 244  | 170 | 395  | 280  | 195 | 430  |
| 6                     | 283  | 200 | 460  | 325  | 230 | 505  |
| 7                     | 326  | 231 | 525  | 375  | 265 | 580  |
| 8                     | 365  | 261 | 585  | 420  | 300 | 660  |
| 9                     | 404  | 283 | 660  | 465  | 325 | 730  |
| 10                    | 444  | 326 | 720  | 510  | 375 | 800  |
| 11                    | 478  | 357 | 785  | 550  | 410 | 880  |
| 12                    | 518  | 383 | 850  | 595  | 440 | 955  |
| 13                    | 552  | 413 | 920  | 635  | 475 | 1025   |
| 14                    | 587  | 444 | 985  | 675  | 510 | 1095   |
| 15                    | 622  | 470 | 1050   | 715  | 540 | 1160   |
| 16                    | 657  | 496 | 1115   | 755  | 570 | 1230   |
| 17                    | 696  | 522 | 1180   | 800  | 600 | 1300   |
| 18                    | 744  | 552 | 1240   | 855  | 635 | 1370   |
| 19                    | 761  | 578 | 1310   | 875  | 665 | 1440   |
| ...                   | ...  | ... | ...  | ...  | ... | ...  |



## Cadenas de aisladores

- ✓ Modelo más preciso : Curva de aguante  $V(t)$  tensión- tiempo
- ✓ Modelo mucho más preciso: mecanismo físico de la descarga (modelo “líder”)



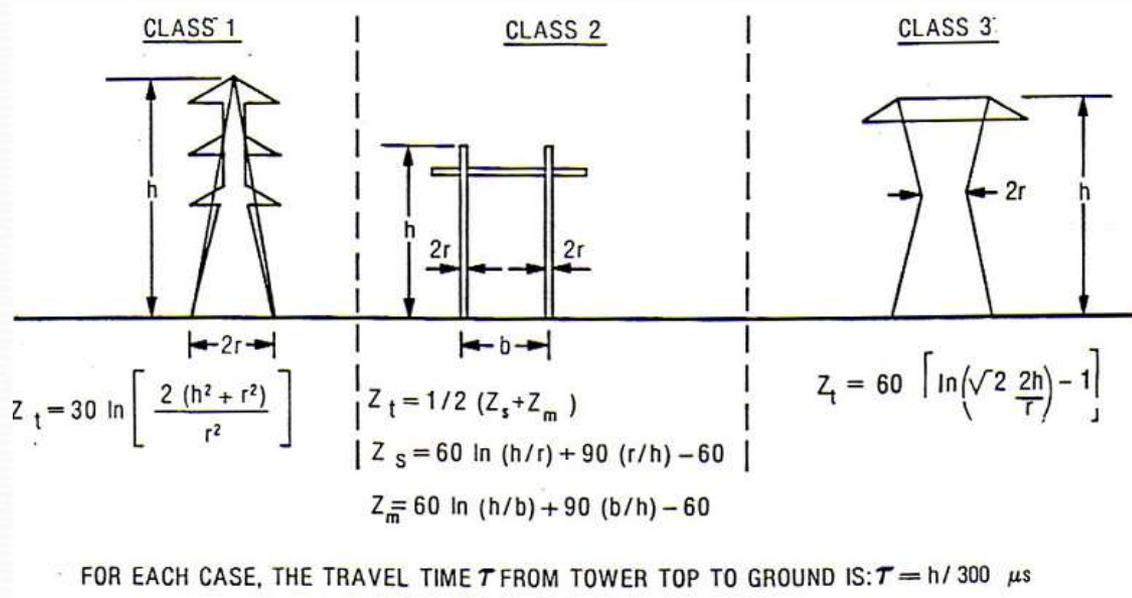
## Impedancia de onda de la torre

- ✓ La torre se considera una “línea de transmisión” de parámetros distribuidos, con longitud igual a su altura, tiempos de propagación iguales a la velocidad de la luz, y valor de impedancia de onda de entre 100 y 300 ohmios.
- ✓ La impedancia de onda de la torre se “termina” con la resistencia de puesta a tierra.

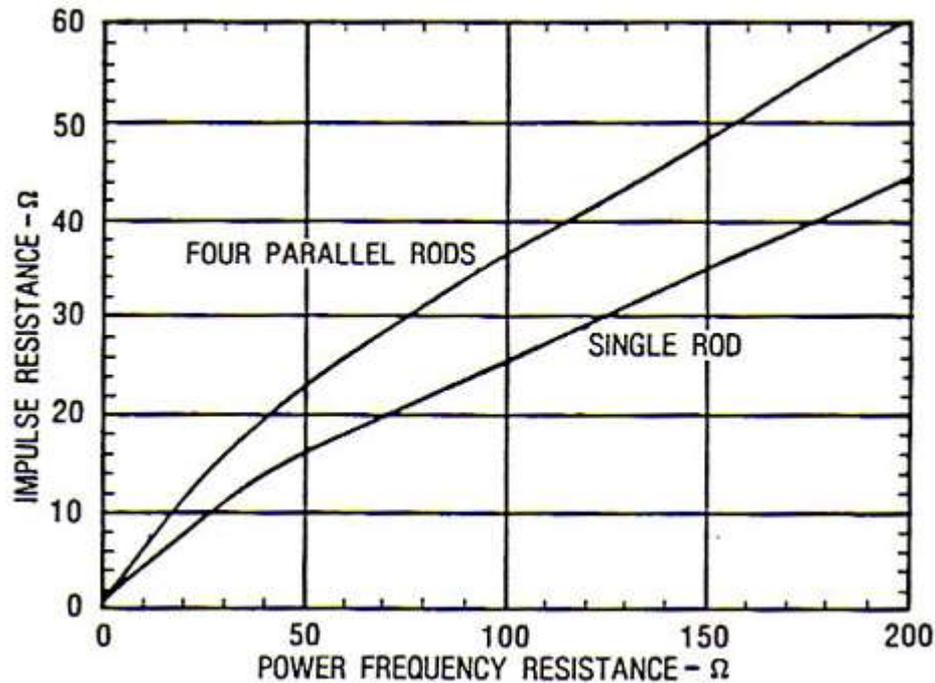


## Fórmulas empíricas para torres típicas

(Cuando la torre no es metálica (hormigón, madera) las fórmulas son válidas si se toma  $r$ =radio del conductor de bajada que conecta el cable de guardia a tierra).



## Resistencia de puesta a tierra



**Corrección de resistencia de p.a.t de jabalinas para tener en cuenta los efectos inductivos, ionización del terreno, etc.  
(Si no se tiene en cuenta se obtienen resultados conservadores)**

## Modelo de resistencia no lineal R(I)

La puesta a tierra en la torre de estudio se representará mediante una resistencia,  $R_i$ , cuyo valor variará de acuerdo con la magnitud de la corriente de descarga  $I_R$  [7]

$$R_i = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_R}{I_\varepsilon}\right)^2}} \quad (25)$$

donde

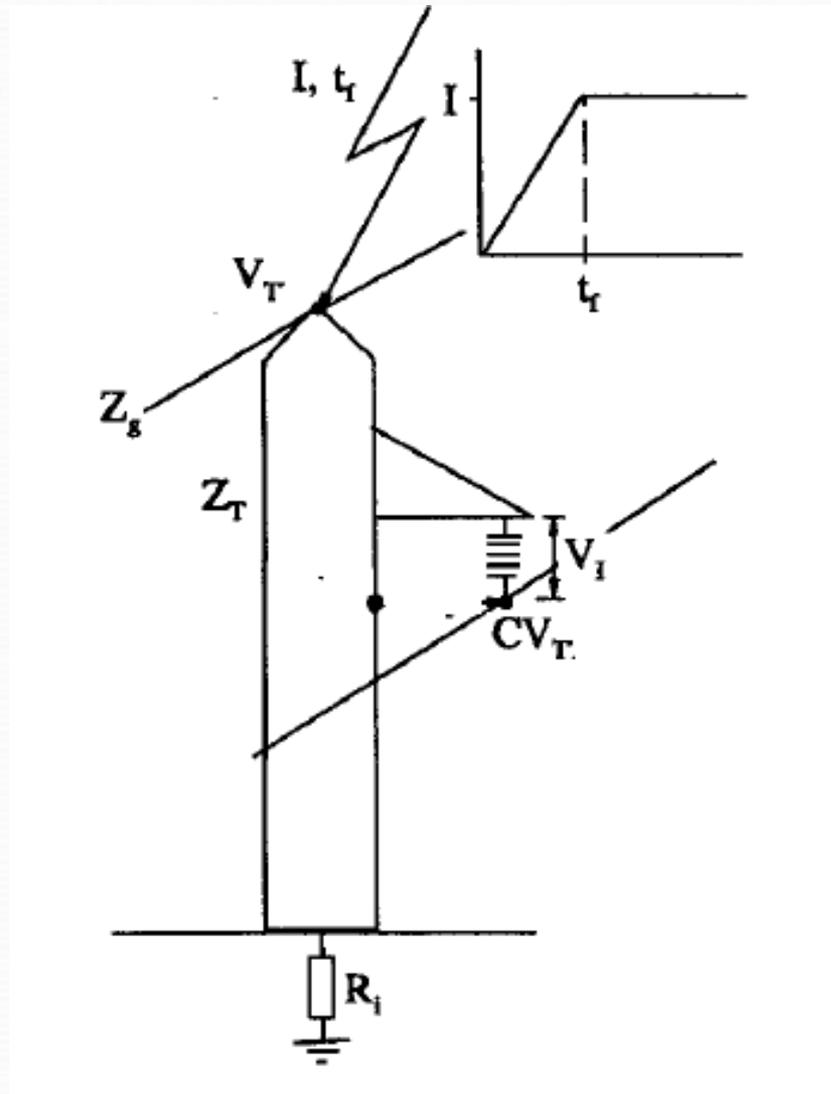
$$I_\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_o}{R_o^2} \quad (26)$$

siendo  $R_o$  la resistencia medida a baja corriente, en ohm

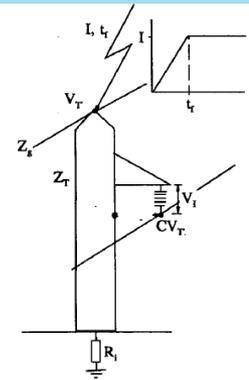
$\rho$  la resistividad del terreno, en ohm-m

$E_o = 400$  kV/m.

# CALCULO DE DESCARGAS INVERSAS



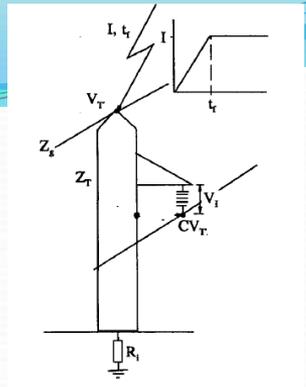
## Descripción cualitativa



a) Una vez que el rayo incide en la torre, se divide entre los diversos caminos disponibles (por la torre y hacia las torres adyacentes a través del cable de guardia), y crea ondas de tensiones fase-tierra que se van propagando a la velocidad de la luz.

b) En la formación de estas ondas se deben tener en cuenta las reflexiones y refracciones en la base de la torre.

También tienen influencia las primeras reflexiones que llegan de las torres vecinas para vanos no excesivamente largos (p.ej: para un vano de 600 m, las reflexiones “vuelven” recién a los  $4 \mu\text{s}$ , por lo que ya su influencia es menor).



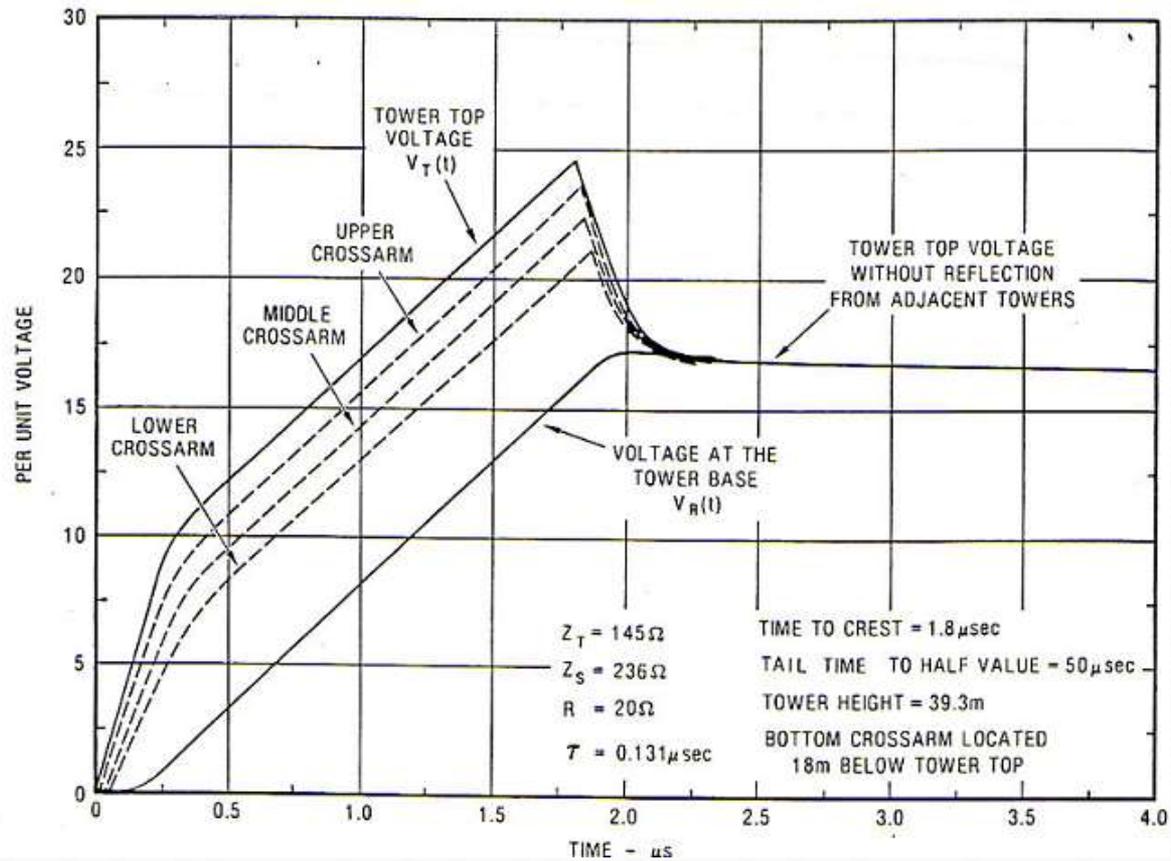
**c) Cada cadena de aisladores (o distancia en aire, si fuera menor que la longitud de cadena) queda sometida del lado de la torre a una tensión igual a la desarrollada en la correspondiente ménsula.**

**Asimismo, la cadena queda sometida del lado del conductor de fase a la combinación de tensión a frecuencia industrial y tensión inducida en la fase por la corriente que circula por el cable de guardia.**

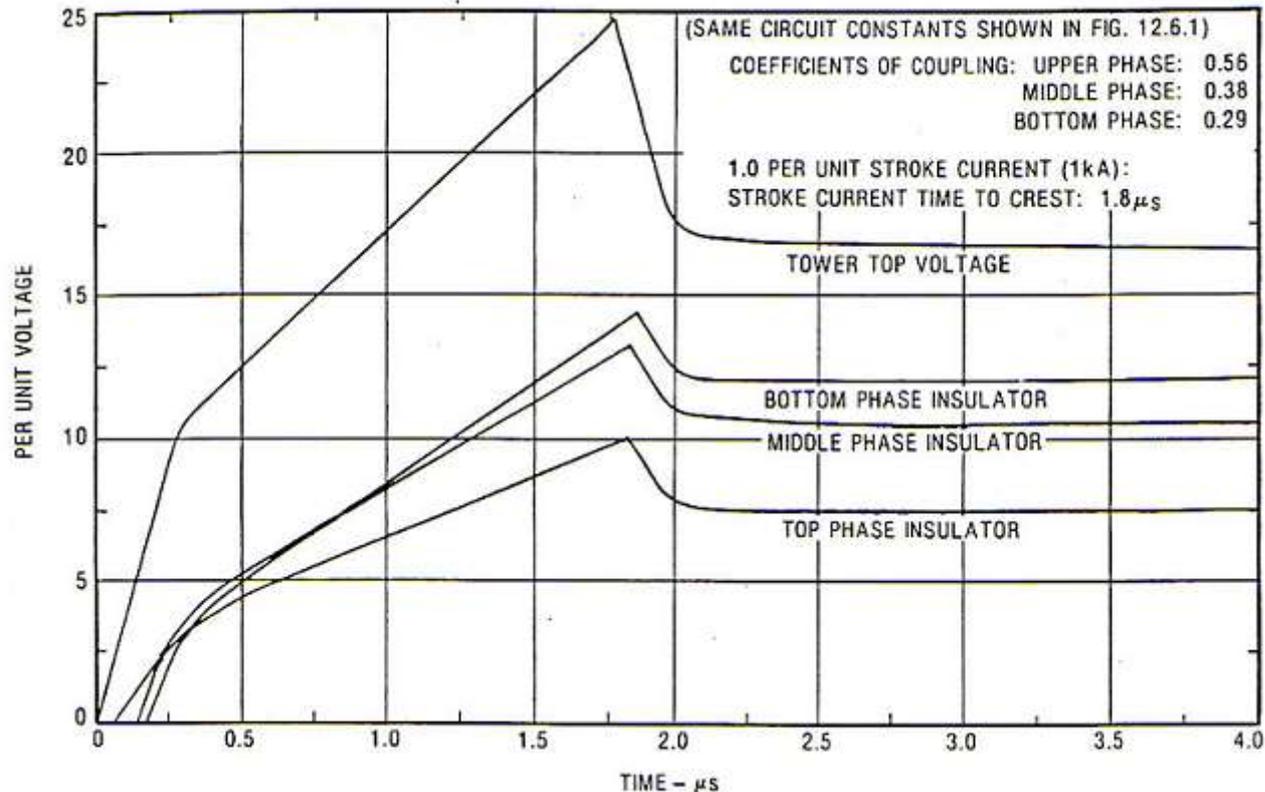
**La cadena de aisladores queda sometida, por lo tanto, a la diferencia (instante a instante) entre estas 2 tensiones.**

**Si la tensión neta es superior a la soportada por la cadena se producirá, por lo tanto, un contorneo a lo largo de la cadena.**

## Tensiones desarrolladas a lo largo de la torre

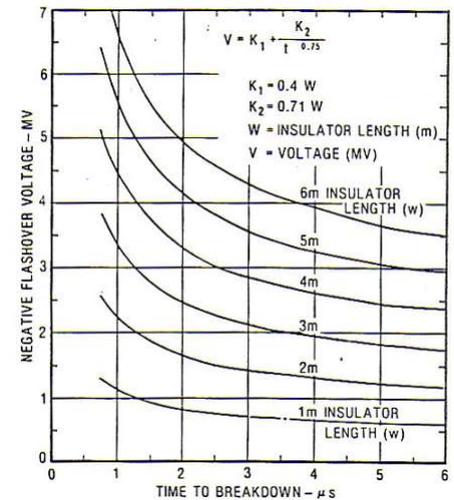
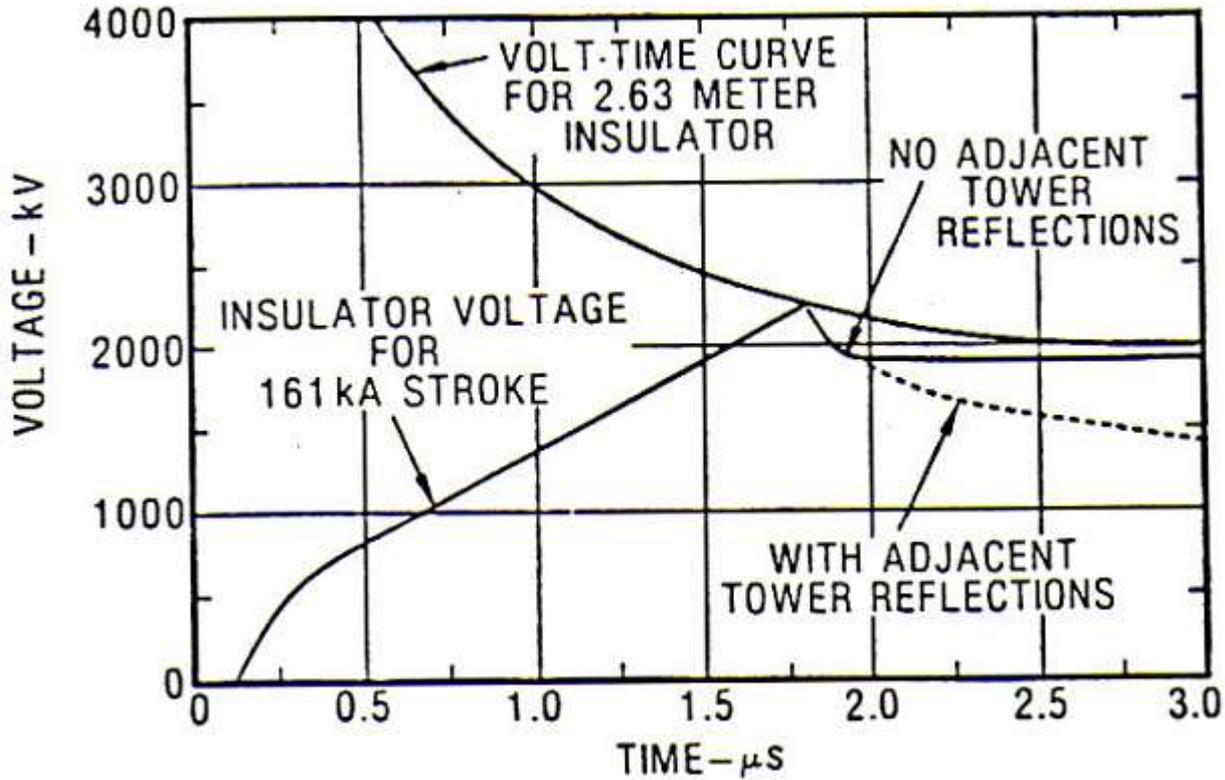
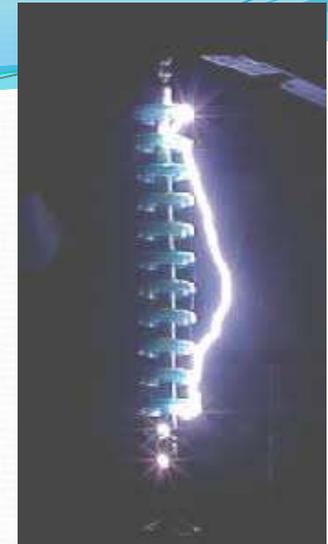


## Influencia de las tensiones inducidas por los cables de guardia



**A esta tensión se le deber superponer la tensión de frecuencia industrial instantánea que existe en el conductor de fase en el instante de evaluación (por superposición estadística (Monte Carlo) o “barrido” determinístico de la onda a frecuencia industrial)**

# Comparación con la tensión soportada por la cadena.



## **Comentarios:**

- ✓ **En caso que la distancia en aire sea inferior a la longitud de cadena se hace la evaluación para esta distancia en aire. Se puede asumir que la curva de soportabilidad es la misma que la de la cadena, tomando la distancia en aire en vez de la longitud de cadena.**
- ✓ **Esta evaluación se debe hacer para cada una de las fases (dada la influencia de la posición de la ménsula y de la tensión a frecuencia industrial), registrándose para cada intervalo de tiempo en que se muestrea la tensión a frecuencia industrial el valor de corriente que provoca la descarga (corriente crítica) inferior entre las 3 fases.**
- ✓ **La fase correspondiente al menor valor de corriente crítica (fase “dominante” en cada intervalo de tiempo) es aquélla en que se produce el contorneo, y se asume que el propio contorneo (al “descargar” la tensión de torre) impide que descargue posteriormente ninguna de las restantes fases.**

## Tasa de falla por descarga inversa



Sea:

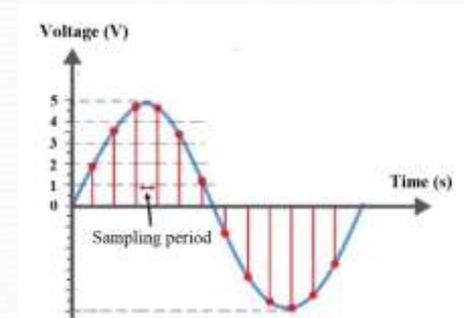
$N_T$  = Número total de rayos incidente en la torre, por 100 km-año

$\Delta tj$  (en p.u del ciclo) = intervalo elemental de tiempo usado para el muestreo de la onda a frecuencia industrial

De entre todos los  $N_T$  rayos, sólo aquéllos cuyo valor de pico de corriente sea superior a la corriente crítica provocan la descarga inversa.

$I_j$  = Corriente crítica para el intervalo elemental  $\Delta tj$   
 $P_j$  = Probabilidad de que  $I_j$  sea excedida

$P_j \Delta tj$  = probabilidad conjunta de que se exceda la corriente  $I_j$  crítica mientras estamos en el intervalo  $\Delta tj$ .



$$P_j = 1 / (1 + (I_j / 31)^{2.6})$$

## Tasa de falla por descarga inversa.

**$NBF = N_T \sum_j P_j \Delta t_j$  = tasa de falla por descarga inversa (número de fallas por descarga inversa por 100 km y por año)**



### Comentario:

**Este método simplificado no tiene en cuenta el hecho de que la tensión soportada por la cadena (para cada forma de onda y tensión de pico aplicada) no es, en rigor, una constante sino una variable aleatoria.**

**El error introducido es pequeño, teniendo en cuenta que la correspondiente distribución de probabilidad tiene una desviación “standard” pequeña (del orden del 3 %)**

# CALCULO DE DESCARGAS DIRECTAS



## Descripción cualitativa

**Modelo electrogeométrico: existe un valor de corriente de rayo máximo que puede incidir directamente en la fase (rayos de corrientes mayores son interceptados por los cables de guardia o caen directamente a tierra).**

**De entre todos los rayos cuya corriente es inferior a ese valor máximo, centraremos nuestra atención exclusivamente en aquéllos cuyo valor de corriente es suficiente para hacer contornear la cadena de aisladores.**

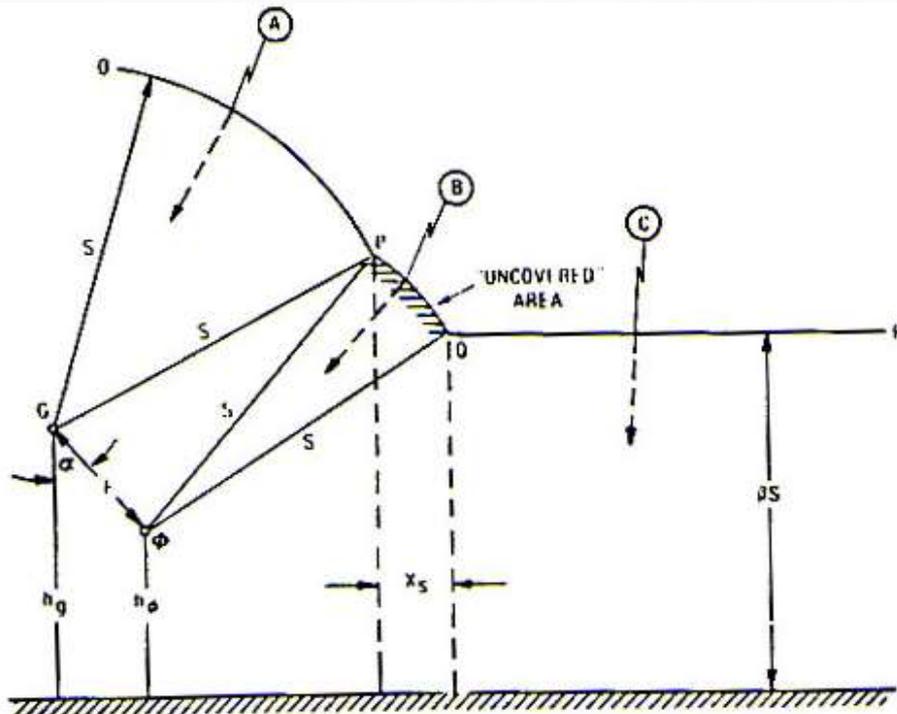
## El modelo electrogeométrico

**El modelo electrogeométrico se basa en la suposición de que un rayo acercándose a la línea hará el “salto final” hasta un objeto bajo él (el cable de guardia, la fase o la tierra) toda vez que la distancia a ese objeto sea inferior a una cierta “distancia de descarga”  $S$  que es función de la corriente de rayo  $I$ .**

$$S=10.I^{0,65} \text{ (S en m, I en kA).}$$

## El modelo electrogeométrico

Para una corriente / dada:



(A) INCOMPLETE SHIELDING - WIDTH  $x_s$  IS UNCOVERED.  
STROKE (B) JUMPS TO THE PHASE CONDUCTOR  $\phi$

✓ El rayo A hará su “salto final” hacia el cable de guardia, dado que al “tocar” el arco OP la punta del rayo está a una distancia  $S$  del cable de guardia y a una distancia mayor que  $S$  de la fase.

✓ El rayo B incidirá en la fase.

✓ El rayo C incidirá en la tierra. La distancia de descarga a la tierra se afecta por un factor  $\beta \leq 1$  de forma que los rayos incidirán en la tierra si se acercan a ella a una distancia  $\beta \cdot S$ .

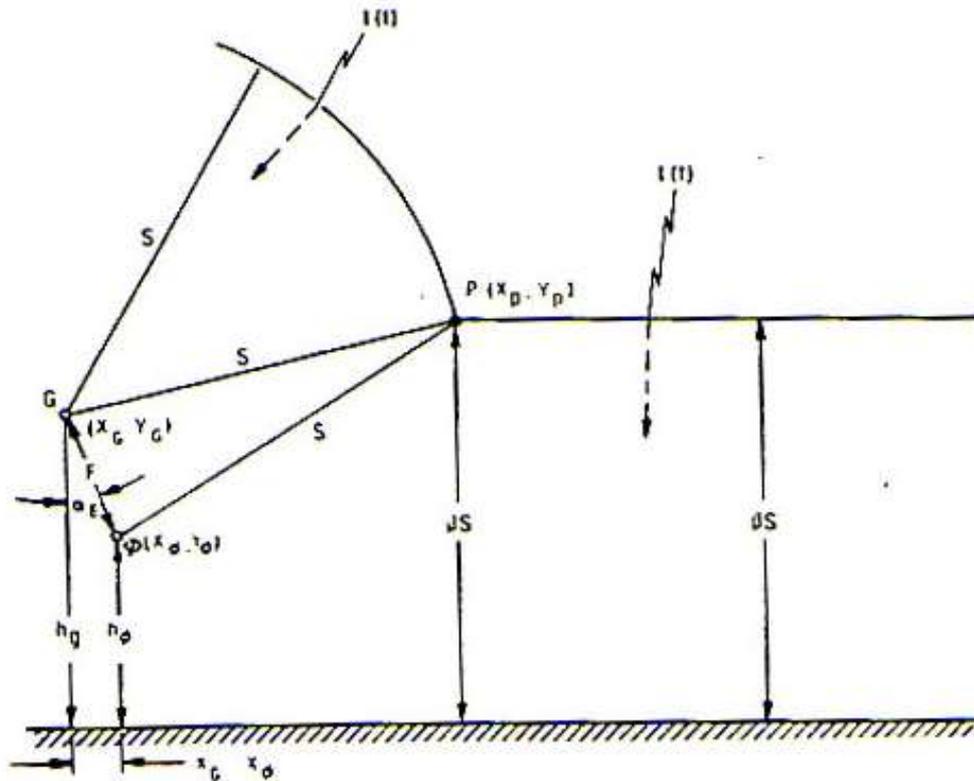
✓ Para una geometría dada, a medida que  $I$  crece  $x_s$  se va estrechando, por lo que existirá un valor de corriente máximo ( $I_{\max}$ ) por encima del cual no puede haber descarga directa

## Comentarios

- ✓ En forma simplificada, se suele asumir que los rayos sólo caen verticalmente, por lo que los rayos que inciden en la fase serán aquéllos que incidan en la “faja” de ancho  $X_s$  indicada en la figura.
- ✓  $X_s$  se puede calcular en función de  $S$  y de la geometría de la línea.  
(Ver apuntes)
- ✓ Para estos cálculos se toman alturas promedios de los conductores (altura en la torre menos  $2/3$  de la flecha).
- ✓ Las fórmulas valen para las fases externas, que son las realmente expuestas a las descargas directas. Se considera habitualmente que las fases centrales están “perfectamente protegidas” por los cables de guardia.

## Blindaje perfecto

Para cada corriente  $I$  es posible encontrar una posición del cable de guardia de forma tal que no haya una faja  $X_s$  "expuesta" (blindaje perfecto)



(B) EFFECTIVE SHIELDING — UNPROTECTED WIDTH  $x_s$  IS REDUCED TO ZERO

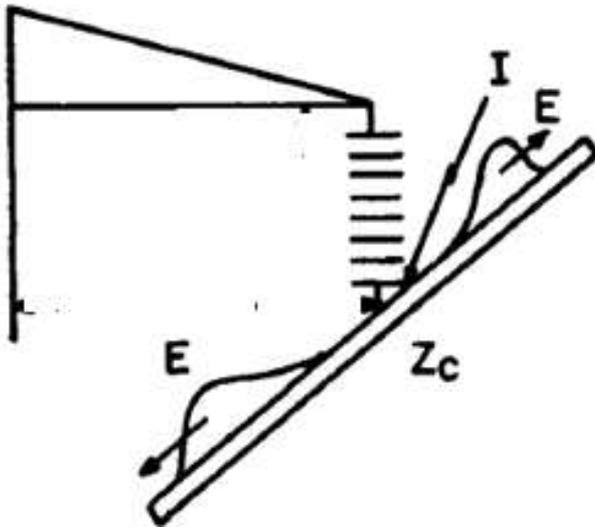
## Corriente de descarga mínima

$E = Z_c \cdot I / 2$        $Z_c$  : impedancia de onda propia del conductor de fase

La corriente  $I = I_{\min}$  capaz de provocar contorneo de la cadena será aquella asociada a  $E = V_C =$  tensión de contorneo de la cadena.

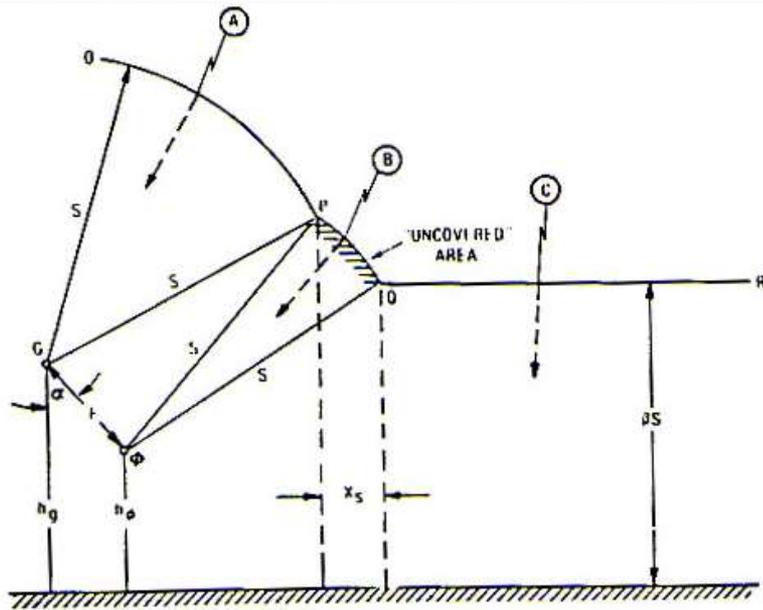
En los cálculos simplificados se asume  $V_C = CFO$  (tensión de aguante de la cadena con probabilidad 50 %).

En los cálculos apoyados en simulaciones  $V_C$  se estima por prueba y error.

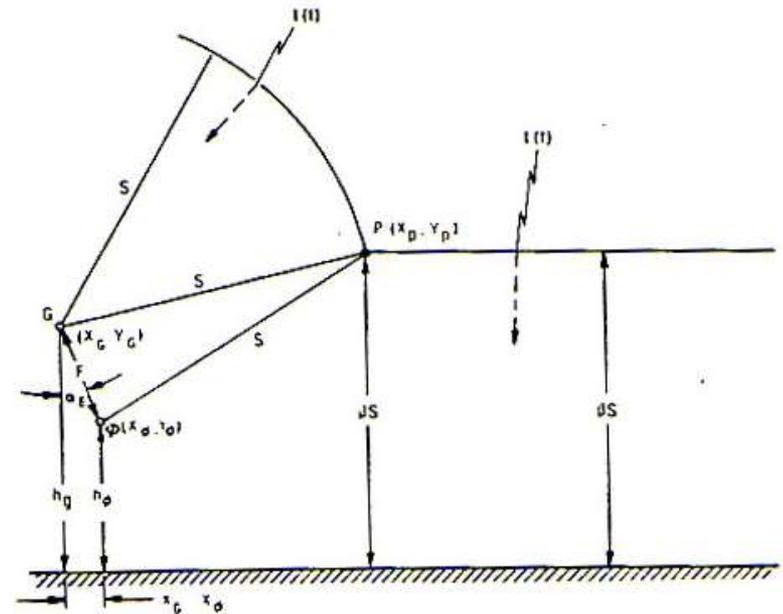


## Corriente de descarga máxima

La “striking distance” máxima  $S_{max}$  se calcula a partir de la geometría de la torre, imponiendo la condición  $X_s=0$  (Ver detalles en los apuntes)



(A) INCOMPLETE SHIELDING – WIDTH  $x_s$  IS UNCOVERED.  
STROKE (B) JUMPS TO THE PHASE CONDUCTOR  $\phi$



(B) EFFECTIVE SHIELDING – UNPROTECTED WIDTH  $x_s$  IS REDUCED TO ZERO

La  $I_{max}$  correspondiente se obtiene de:  $S_{max} = 10 \cdot I_{max}^{0,65}$



## Tasa de falla por descarga directa

- a) Se calcula la corriente de descarga mínima  $I_{\min}$  que produce falla de blindaje, su correspondiente  $S$ , su “faja expuesta”  $X_S$  (fórmulas de  $X_S$  en función de  $S$ ) y la correspondiente probabilidad  $P_{\min}$  que la corriente  $I_{\min}$  sea excedida (fórmula vista de probabilidad de corrientes de rayo)
- b) Se calcula la corriente de descarga máxima  $I_{\max}$  que produce falla de blindaje, y la correspondiente probabilidad  $P_{\max}$  que la corriente  $I_{\max}$  sea excedida.
- c) Dado que para  $I_{\max}$  el blindaje es perfecto ( $X_S = 0$ ) la “faja expuesta” promedio para corrientes entre  $I_{\max}$  e  $I_{\min}$  es  $X_S/2$ .



## Tasa de falla por descarga directa

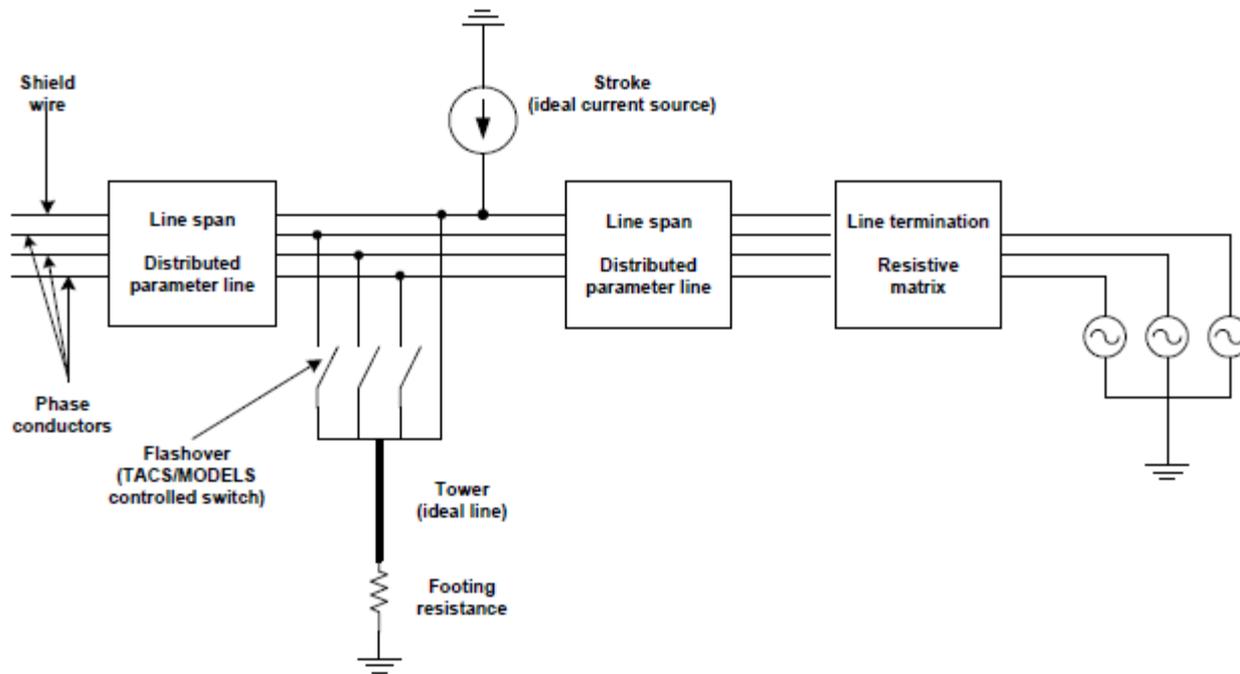
d) La tasa de falla por descarga directa se calcula contando de entre el número de rayos totales por  $\text{km}^2$  :  $N=0,04 T^{1,25}$  ( $T$ =nivel cerámico en días) aquéllos que simultáneamente inciden en una faja de ancho  $X_S/2$  (m) y tienen un valor de corriente de pico comprendido entre  $I_{\min}$  e  $I_{\max}$

e) El número de descargas directas por 100 km-año  $N_{SF}$  vale:

$$N_{SF} = 0,004 T^{1,25} \cdot X_S / 2 \cdot (P_{\min} - P_{\max})$$

## MODELO DE LÍNEA ATP: CARACTERÍSTICAS GENERALES

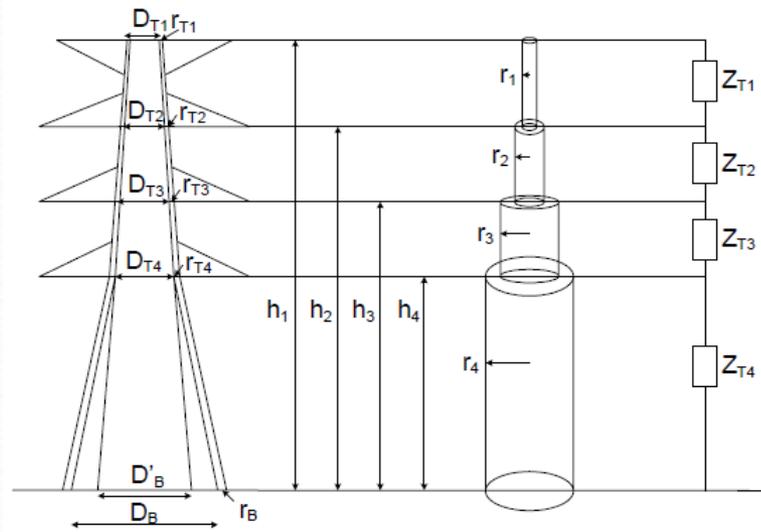
- ✓ Modelo de parámetros distribuidos, a frecuencia fija (cientos de kHz) o dependiente de la frecuencia.
- ✓ Modelado explícito de los cables de guardia.
- ✓ Modelo detallado (vano por vano) en la torre en que cae el rayo y vanos cercanos adyacentes.
- ✓ Modelo simplificado para el resto de la línea.



a) Stroke to a tower/shield wire

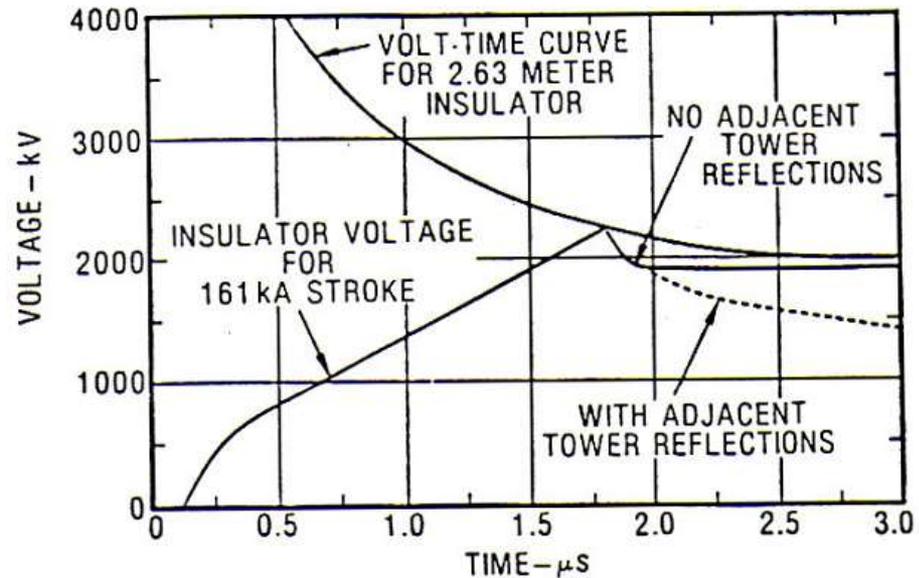
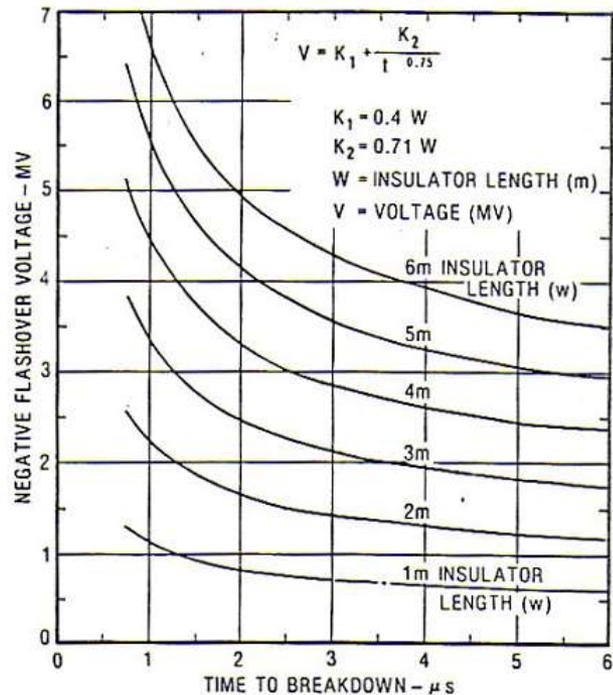
## MODELO DE LÍNEA ATP: TORRES

- ✓ Red de impedancias de onda en la torre en que cae el rayo, identificando la ubicación de cada una de las ménsulas en que se sujetan los conductores.
- ✓ Impedancia de onda en las restantes torres



## MODELO DE LÍNEA ATP: AISLADORES

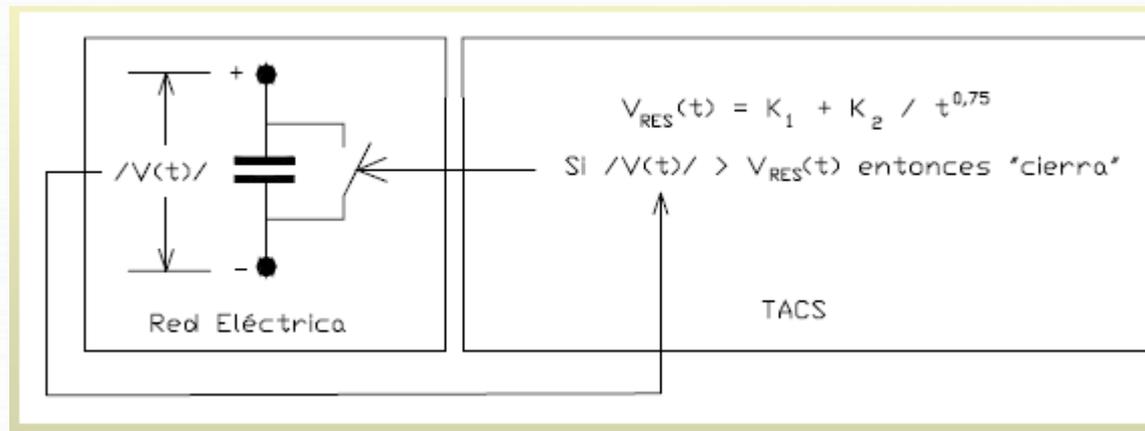
- ✓ Modelo clásico: curva tensión-tiempo (llave controlada por TACS o MODELS)



## MODELO DE LÍNEA ATP: AISLADORES

### Alternativas de modelado:

- ✓ Descarga a tensión fija= Llave controlada por tensión (muy conservador).
- ✓ Modelo de propagación del líder (llave controlada por TACS o MODELS)
- ✓ En todos los casos, se simula también la capacitancia de la cadena de aisladores



# MODELO DE LÍNEA ATP

