

---

## 3. Descripción física del rayo.

### Parámetros

---

#### 3.1. PROCESO DE DESCARGA DE UNA NUBE

El rayo es una descarga transitoria de elevada intensidad; la mitad de estos rayos ocurren en el interior de la nube, y la otra mitad entre nube y tierra.

En el estudio y cálculo de sobretensiones un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. En general, se han identificado cuatro tipos de rayo entre nube y tierra. Las descargas negativas forman el 90 % de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta (categoría 1); menos del 10 % de las descargas son positivas (categoría 3). También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube (categorías 2 y 4), sin embargo, estas descargas son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre. Un aspecto adicional que se debe de tener en cuenta es la distorsión que la presencia de objetos altos puede provocar en los parámetros de un rayo respecto al que se originaría en terreno plano. En la figura 3.1 se pueden ver las diferencias entre las cuatro categorías comentadas.

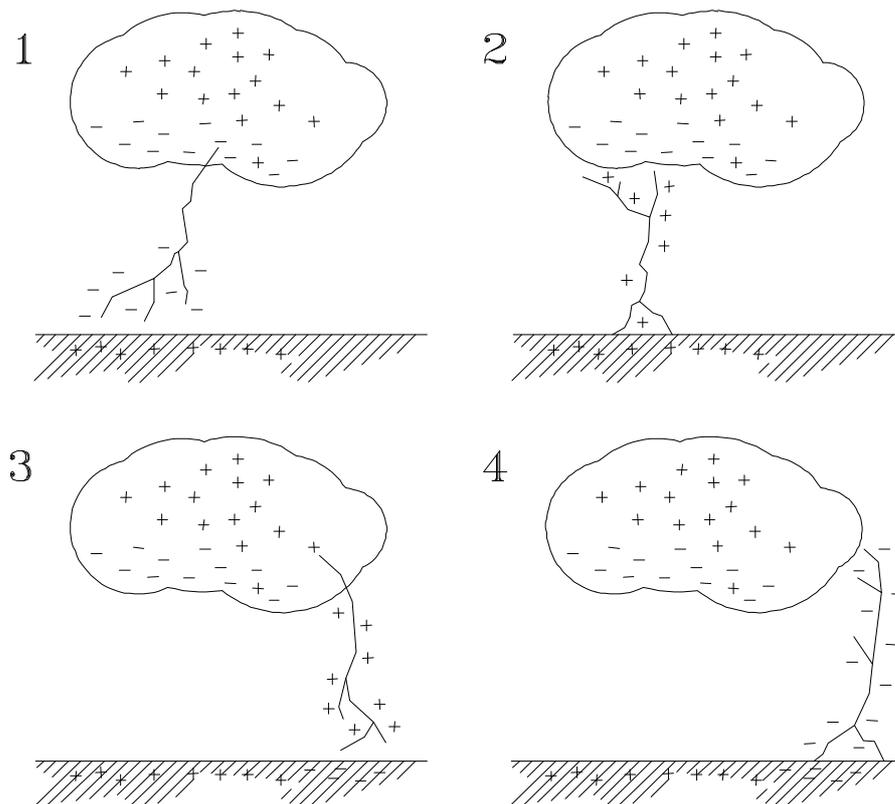


Figura 3.1. Tipos de rayo entre nube y tierra.

Los rayos procedentes de una nube tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de este área el impacto es casi aleatorio. Existe una probabilidad alrededor de un 20 % de que una segunda descarga caiga a 2, 3, o 4 km de la primera, y existe una probabilidad más pequeña de que una descarga caiga a unos 8 km o más de la primera. El valor medio de la distancia entre sucesivos puntos de impacto se encuentra en unos 3.5 km. El comportamiento de las descargas atmosféricas tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que generalmente es necesario un elevado número de medidas para determinar con precisión su distribución.

La figura 3.2 describe el proceso completo de un rayo. En una primera fase el canal se propaga desde la nube hasta tierra en una serie de pasos discretos. El canal se ha iniciado en el interior de la nube a partir de un proceso preliminar de ruptura dieléctrica, aunque no existe en la actualidad un acuerdo sobre la forma exacta y localización de este proceso. El canal se propaga a una velocidad media de aproximadamente  $2 \cdot 10^5$  m/s. La corriente media del canal se encuentra entre 100 y 1000 A. Mientras la punta del canal se acerca a tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos de tierra o en irregularidades de la superficie aumenta hasta que ocurre la ruptura dieléctrica del aire. En ese momento se inician descargas desde esos puntos hasta que contactan con el canal. Una vez el canal ha contactado con tierra, comienza a descargarse por medio de una onda ionizante que se propaga hacia la nube a lo largo del canal previamente ionizado. Este proceso se conoce como primera descarga de retorno. La velocidad de la corriente de retorno del rayo típicamente toma valores de  $1/3$  a  $1/2$  de la velocidad de la luz en el vacío, y decrece con la altura. El tiempo total transcurrido en la propagación de tierra a la nube es del orden de  $70 \mu\text{s}$ . La primera descarga de retorno produce un pico de corriente del orden de 30 kA.

Cuando la descarga de retorno cesa, el proceso que envuelve al rayo, incluyendo varios procesos de descarga en el interior de la nube, podría finalizar. En este caso, este proceso es llamado rayo de un único impacto. Por otro lado, si la nube dispone todavía de carga adicional, otro canal continuo puede propagarse hacia abajo a lo largo del primer canal residual e iniciar otra descarga de retorno. Algunos de estos segundos canales actúan como los primeros porque no siguen el canal de retorno previo. Los segundos canales y las subsiguientes descargas de retorno normalmente no están ramificados. La figura 3.2 puede aclarar este concepto.

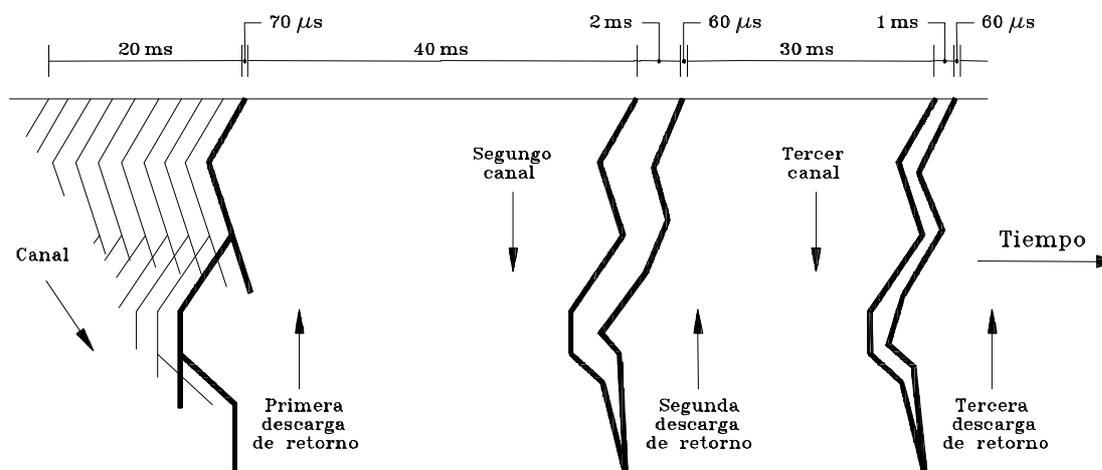


Figura 3.2. Fases de un rayo.

Los rayos de polaridad positiva (ver figura 3.1, categoría 3) tienen un considerable interés práctico porque tanto la corriente de pico como la carga total transferida pueden ser mucho más grandes que las de la mayoría de los rayos con polaridad negativa más comunes. La información archivada sobre elevados picos de corriente, en el rango de 200 a 300 kA, proviene de rayos positivos.

Los rayos positivos contienen normalmente una única descarga de retorno seguida de un periodo de corriente continua. La mayoría de rayos positivos a tierra ocurren durante las tormentas de invierno, aunque estas tormentas producen pocos rayos en general, y es relativamente raro que ocurran en tormentas de verano, no más de un 15 % de los rayos, aunque tormentas con carga predominantemente negativa acaban a menudo con descargas positivas. El porcentaje de descargas positivas en tormentas de verano aparentemente incrementa con un incremento de la latitud geográfica y con un incremento de la altura del terreno, es decir, cuanto más cerca está la carga de la nube de la tierra mayor probabilidad de que ocurran descargas positivas, aunque en la actualidad no se tiene suficientemente conocimiento sobre descargas positivas como para decir que esto es siempre una condición necesaria.

### 3.2. FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE UN RAYO

Desafortunadamente, todas las descargas de un rayo, o descargas en diferentes rayos, no tienen igual severidad. Sus amplitudes y formas de onda varían estadísticamente. La forma de onda de la corriente de retorno depende fuertemente de la polaridad del rayo. En rayos de polaridad negativa, la segunda descarga tiene una forma de onda diferente de la primera, presentando generalmente un frente más rápido y una duración menor. Los impulsos positivos tienen un frente de onda más lento y una duración más prolongada que los negativos.

Se han realizado numerosas medidas experimentales sobre la corriente en la base del canal de una descarga. La figura 3.3 muestra la forma de onda de la corriente de retorno definida por Anderson y Eriksson. En esta figura,  $T_{10}$  es el intervalo de tiempo entre el 10% y el 90% de la corriente de pico del rayo, y  $T_{30}$  es el intervalo de tiempo entre el 30% y el 90% de la corriente de pico. Los valores de corriente se encuentran normalizados.

De manera simplificada se puede utilizar una onda con forma en doble rampa para la corriente del rayo, ver figura 3.4. En este caso, la expresión que sigue la corriente de retorno es la siguiente

$$i(t) = \alpha_1 t u(t) - \alpha_2 (t - t_f) u(t - t_f) = i_1(t) + i_2(t) \quad (3.1)$$

$$\alpha_1 = \frac{I}{t_f}, \quad \alpha_2 = \frac{2 t_h - t_f}{2 t_f (t_h - t_f)} \cdot I$$

donde

- $u(t), u(t-t_f)$       función escalón unidad
- $I$                             intensidad de pico de la onda de la corriente del rayo, en A
- $t_f$                           tiempo de frente de la onda de la corriente del rayo, en s
- $t_h$                           tiempo al valor medio de la intensidad de pico del rayo, en s

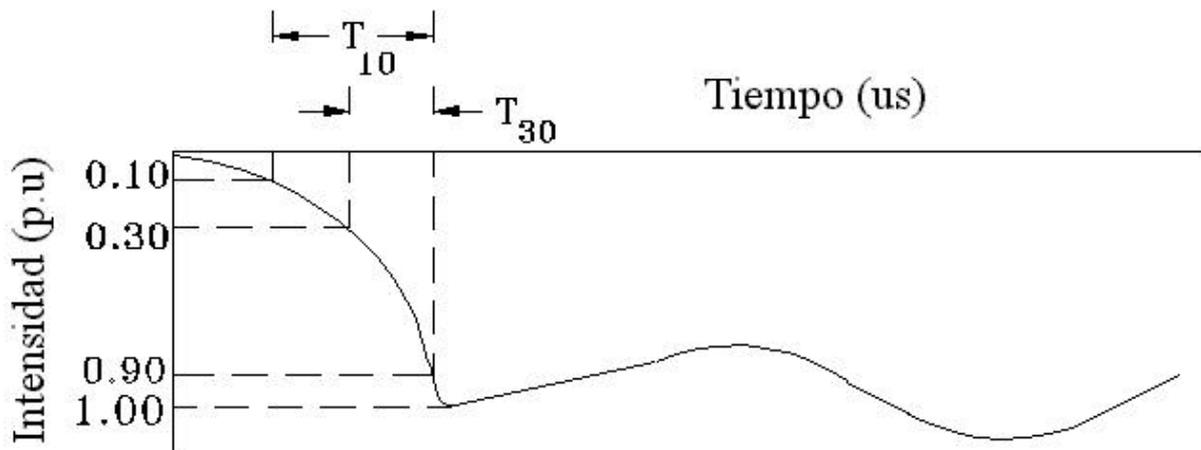


Figura 3.3. Típica forma de la onda de corriente de retorno del rayo

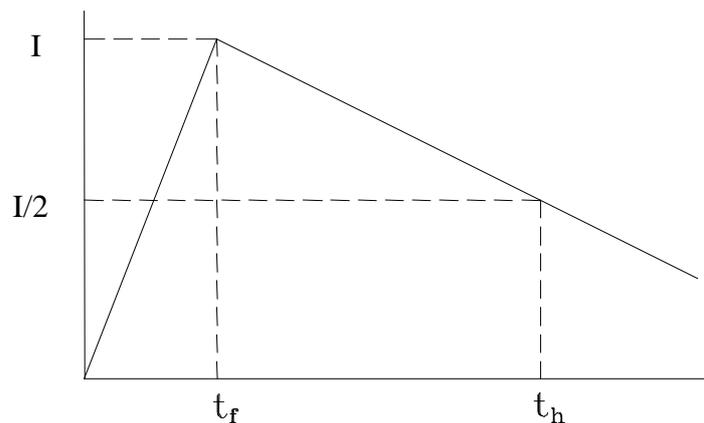


Figura 3.4. Onda de rayo en doble rampa.

En este documento se ha asumido que el primer pico de la forma de onda presentada en la figura 3.3 coincide con el pico de la onda de corriente idealizada con forma en doble rampa, ver figura 3.4. El tiempo de frente equivalente  $t_f$  se obtiene a partir de  $T_{30}$ ,  $t_f = T_{30}/0.6$ .

De aquí en adelante se asumirá una forma de onda positiva para la corriente de retorno del rayo; sin embargo, para los cálculos que se van a realizar da igual si esta forma de onda es positiva o negativa. Además, se va a considerar que la forma de onda permanece constante durante todo el proceso de descarga, es decir los valores de sus parámetros característicos (corriente de pico, tiempo de frente y tiempo al valor medio de la corriente de pico) permanecerán constantes.

En los próximos apartados se estudiarán las funciones de probabilidad que siguen los parámetros más importantes de un rayo: corriente de pico, y tiempo de frente. En este documento se ha asumido un valor constante para el tiempo al valor medio de la corriente de pico.

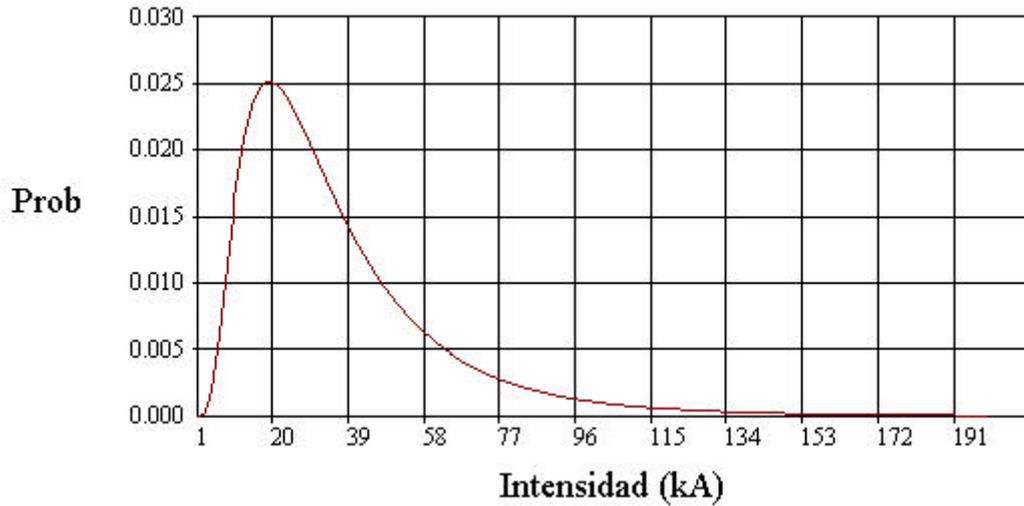


Figura 3.5. Función densidad de probabilidad para I.

### 3.3. FUNCIONES DE PROBABILIDAD PARA LA CORRIENTE MÁXIMA DE UN RAYO

#### 3.3.1. Función densidad de probabilidad

La función densidad de probabilidad de las amplitudes de la corriente de pico de un rayo,  $p(I)$ , se calcula a partir de la expresión

$$p(I) = \frac{1}{\sigma_{\ln I} I \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{\ln I}}\right)^2\right\} \quad (3.2)$$

donde  $\bar{I}$  y  $\sigma_{\ln I}$  son el valor medio y la desviación estándar del logaritmo de la corriente de retorno del rayo. Estos valores están referidos a la primera descarga del rayo, que normalmente es la que presenta un valor de pico más elevado. Generalmente se asumen los siguientes valores

- $\sigma_{\ln I} = 0.65$ ,  $\bar{I} = 29.96$  kA, para descargas con polaridad negativa
- $\sigma_{\ln I} = 1.23$ ,  $\bar{I} = 35.16$  kA, para descargas con polaridad positiva

En este documento se han utilizado los parámetros del rayo correspondientes a descargas con polaridad negativa.

La figura 3.5 muestra gráficamente esta función calculada para descargas con polaridad negativa. Se debe de tener en cuenta que el área encerrada por esta curva debe de ser la unidad.

#### 3.3.2. Función de distribución acumulada

La función de distribución acumulada permite calcular la probabilidad de que la corriente de pico de un rayo,  $I$ , sea igual o más grande que un valor determinado,  $i_0$ .

Esta función se puede calcular

a) a partir de la función densidad de probabilidad,  $p(I)$ , tal como se muestra a continuación

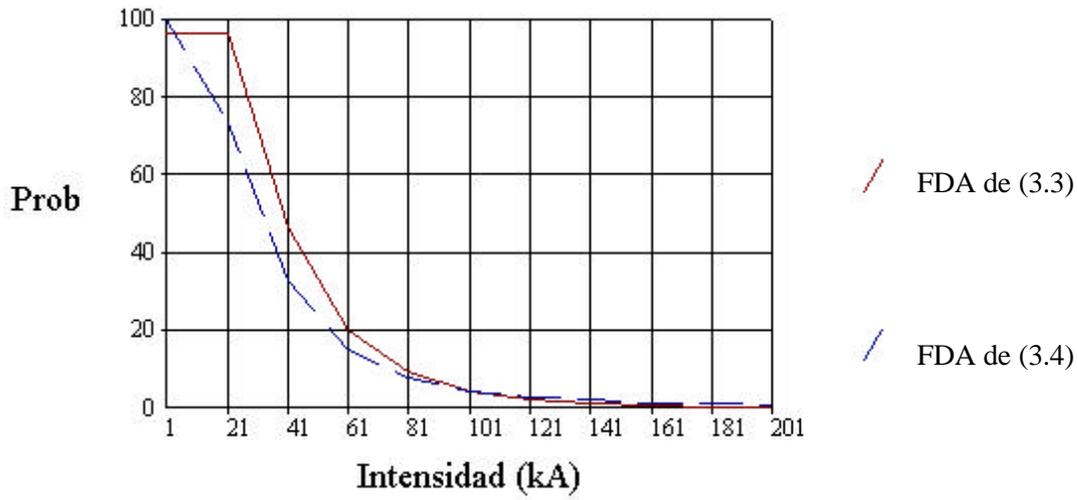
$$P(I \geq i_0) = p(i_0) \cdot \Delta I + p(i_0 + \Delta I) \cdot \Delta I + \dots + p(200 \text{ kA}) \cdot \Delta I \tag{3.3}$$

Para que la expresión (3.3) sea precisa el incremento de intensidad,  $\Delta I$ , debe de ser pequeño.

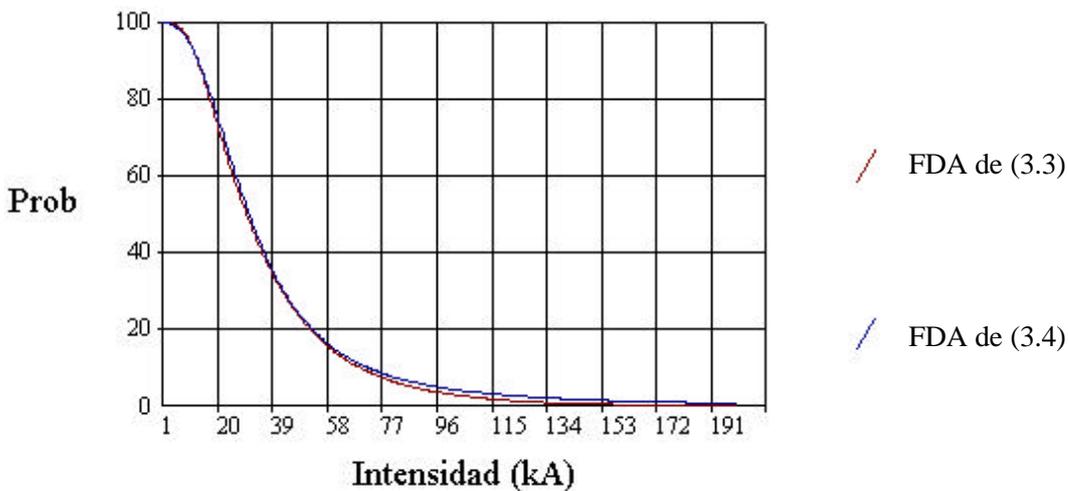
b) mediante la siguiente aproximación

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (i_0/31)^{2.6}} \tag{3.4}$$

La figura 3.6 compara gráficamente la función de distribución acumulada calculada a partir de  $p(I)$  según la expresión (3.3) y calculada directamente mediante la expresión (3.4). En la figura 3.6a se ha utilizado un  $\Delta I = 20 \text{ kA}$ , mientras que en la figura 3.6b se ha utilizado un  $\Delta I = 0.5 \text{ kA}$ . Se puede observar que si se utiliza un  $\Delta I$  grande la diferencia puede ser considerable, sobretodo con valores de intensidad pequeños.



a)  $\Delta I = 20 \text{ kA}$



b)  $\Delta I = 0.5 \text{ kA}$

Figura 3.6. Función de distribución acumulada.

### 3.4. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD PARA EL TIEMPO DE FRENTE DE LA ONDA DE CORRIENTE DE UN RAYO

#### 3.4.1. Función densidad de probabilidad

De forma similar a la corriente de pico, la densidad de probabilidad del tiempo de frente de la onda de corriente de un rayo,  $p(t_f)$ , se puede obtener a partir de la siguiente expresión, ver figura 3.7

$$p(t_f) = \frac{1}{\sigma_{\ln t_f} t_f \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t_f - \ln \bar{t}_f}{\sigma_{\ln t_f}} \right)^2 \right\} \quad (3.5)$$

donde  $\bar{t}_f$  y  $\sigma_{\ln t_f}$  son el valor medio y la desviación estándar del logaritmo del tiempo de frente de onda. Generalmente se asumen los siguientes valores:  $\sigma_{\ln t_f} = 0.55$ ,  $\bar{t}_f = 3.83 \mu s$ .

### 3.5. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD CONJUNTA PARA LA CORRIENTE Y EL TIEMPO DE FRENTE DE UN RAYO

#### 3.5.1. Función densidad de probabilidad

La función densidad de probabilidad conjunta,  $p(I, t_f)$ , para una combinación de la corriente de pico de un rayo,  $I$ , y del tiempo de frente de la onda,  $t_f$ , viene expresada por

$$p(I, t_f) = \frac{1}{(2\pi)(I \cdot t_f)(\sigma_{\ln I} \cdot \sigma_{\ln t_f})\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp \left[ \frac{-0.5}{(1-\rho^2)} \left\{ \left( \frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{\ln I}} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{\ln I}} \right) \left( \frac{\ln t_f - \ln \bar{t}_f}{\sigma_{\ln t_f}} \right) + \left( \frac{\ln t_f - \ln \bar{t}_f}{\sigma_{\ln t_f}} \right)^2 \right\} \right] \quad (3.6)$$

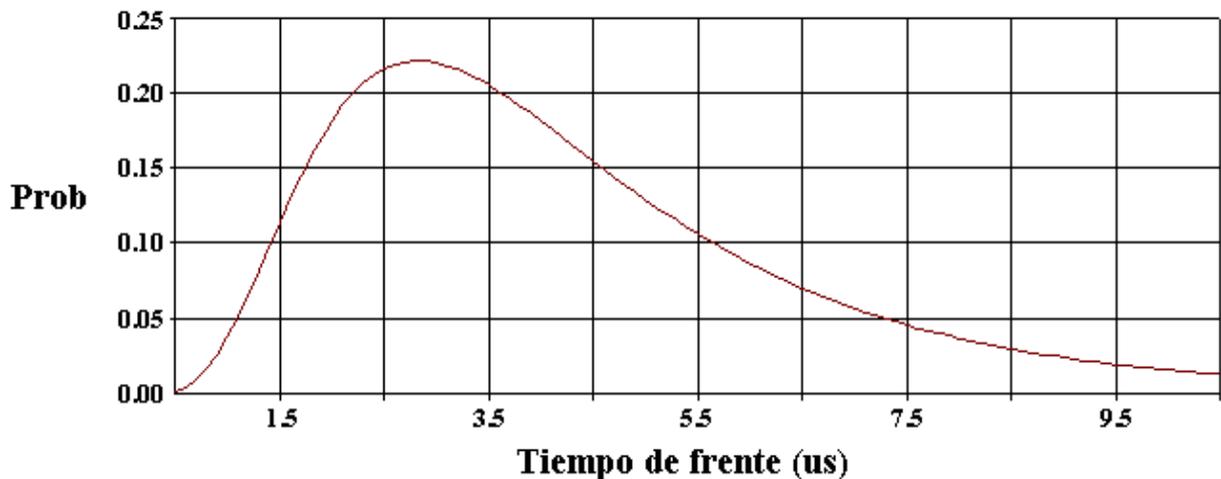


Figura 3.7. Función densidad de probabilidad para  $t_f$ .

donde  $\rho$  es el coeficiente de correlación. Si la intensidad y el tiempo de frente están distribuidos independientemente,  $\rho = 0$ , y la densidad de probabilidad conjunta queda de la siguiente forma

$$p(I, t_f) = p(I) \cdot p(t_f) \quad (3.7)$$

La función densidad de probabilidad conjunta se puede calcular de dos maneras diferentes dependiendo de los valores que se hayan escogido para los parámetros estadísticos que definen a la intensidad de la descarga.

a) Dos tipos de parámetros estadísticos para la intensidad, ver figura 3.8

Para valores de intensidad menores o iguales que 20 kA:

- $\sigma_{\text{Int}} = 1.33$ ,  $\bar{I} = 61.1$  kA;  $\sigma_{\text{Intf}} = 0.55$ ,  $\bar{t}_f = 3.83$   $\mu\text{s}$

y para valores más grandes que 20 kA:

- $\sigma_{\text{Int}} = 0.60$ ,  $\bar{I} = 33.3$  kA;  $\sigma_{\text{Intf}} = 0.55$ ,  $\bar{t}_f = 3.83$   $\mu\text{s}$

Coefficiente de correlación de  $\rho = 0.47$ .

b) Un solo tipo de parámetros estadísticos para la intensidad, ver figura 3.9

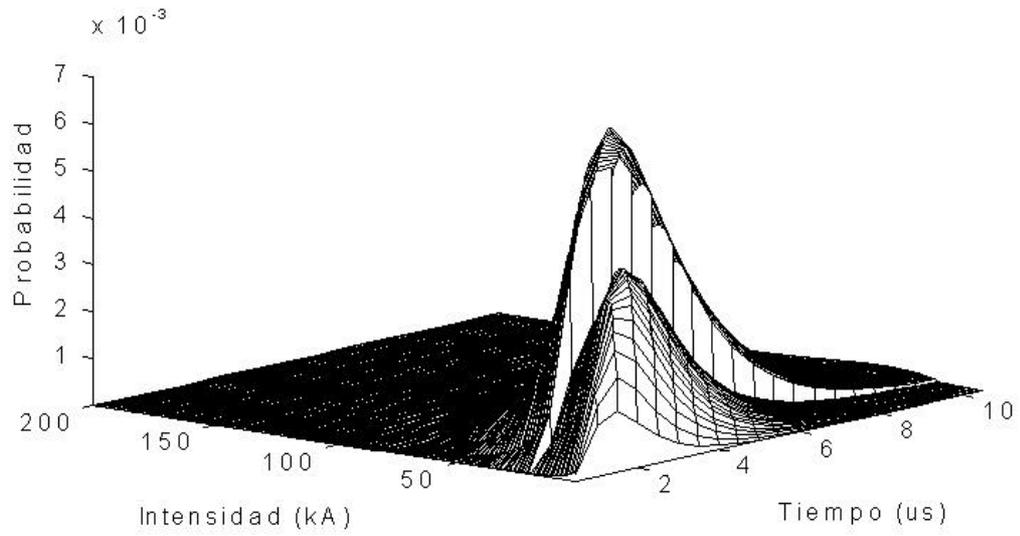
Para cualquier valor de intensidad:

- $\sigma_{\text{Int}} = 0.65$ ,  $\bar{I} = 29.96$  kA,  $\sigma_{\text{Intf}} = 0.55$ ,  $\bar{t}_f = 3.83$   $\mu\text{s}$

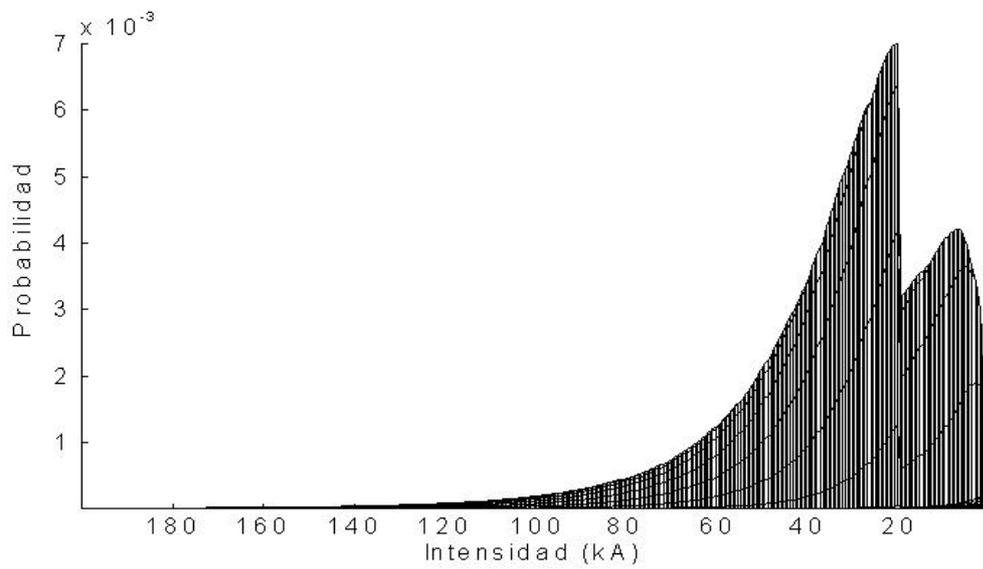
Coefficiente de correlación de  $\rho = 0.47$ .

La figura 3.10 muestra gráficamente la función densidad de probabilidad, calculada según la expresión (3.6) con un solo tipo de parámetros estadísticos para la intensidad, para un tiempo de frente de 2  $\mu\text{s}$ . La forma de esta curva es similar a la obtenida con la expresión (3.2), función densidad de probabilidad para I, sin embargo, ahora el área encerrada por esta curva no puede ser la unidad, de ahí que los valores de la probabilidad sean diferentes, porque en realidad este gráfico no es más que un corte, para  $t_f = 2$   $\mu\text{s}$ , del gráfico presentado en la figura 3.9. El área encerrada por la curva tridimensional si que debe de ser la unidad.

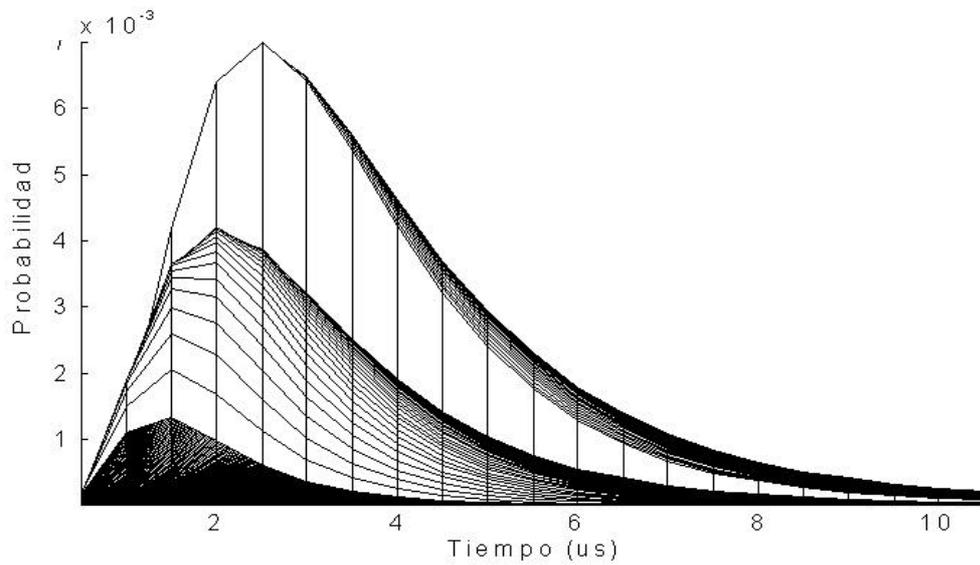
En este documento se ha considerado la expresión (3.6) con dos tipos de parámetros estadísticos para la corriente de pico del rayo, y con las dos variables, intensidad y tiempo de frente, distribuidas independientemente, es decir  $\rho = 0$ .



a) Vista 1

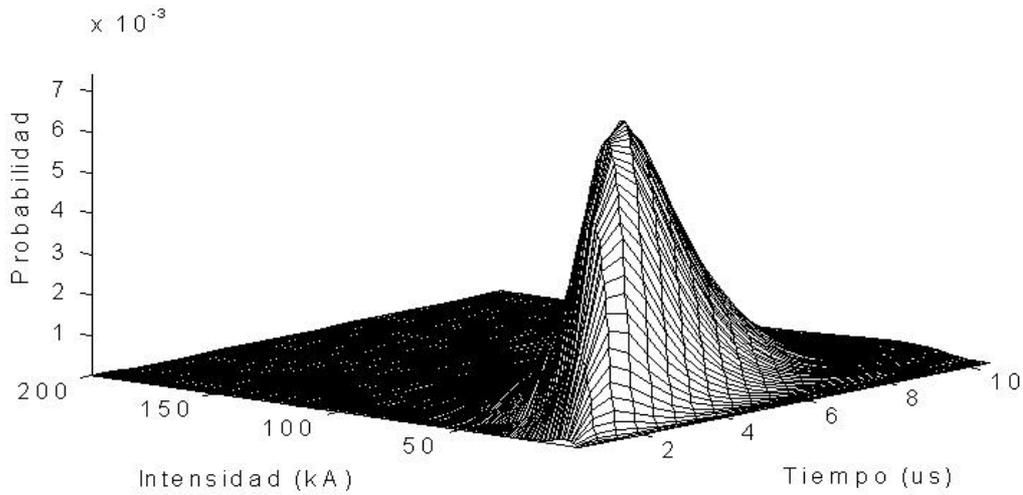


b) Vista 2

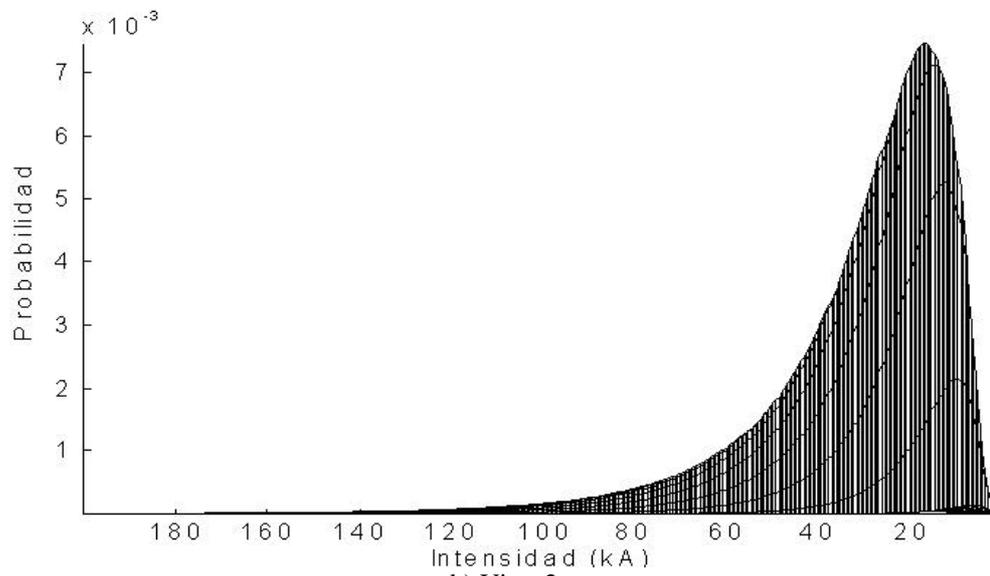


c) Vista 3

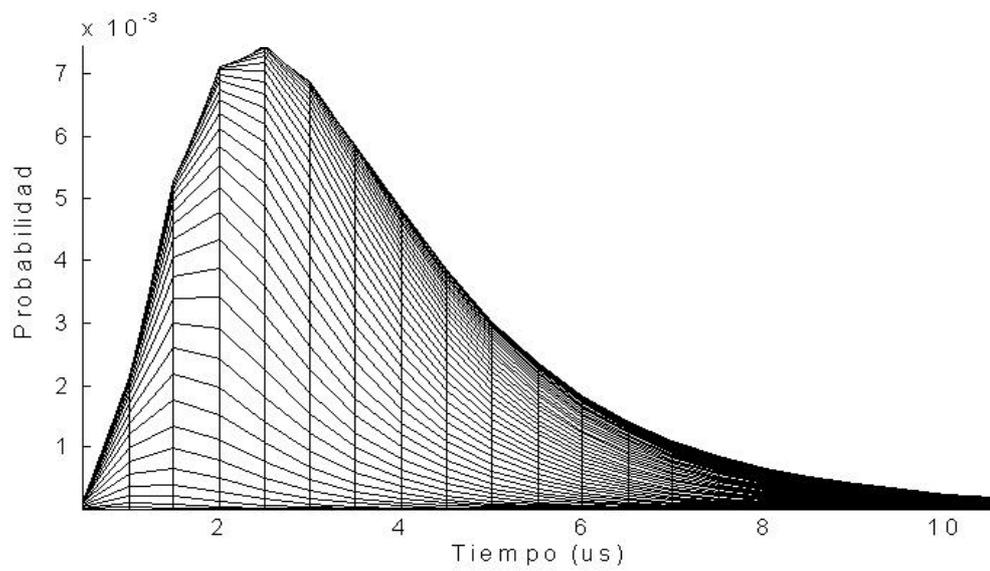
Figura 3.8. Función densidad de probabilidad conjunta para I y para  $t_f$ .  
Dos tipos de parámetros estadísticos para I.



a) Vista 1



b) Vista 2



c) Vista 3

Figura 3.9. Función densidad de probabilidad conjunta para I y para  $t_r$ .  
Un tipo de parámetros estadísticos para I.

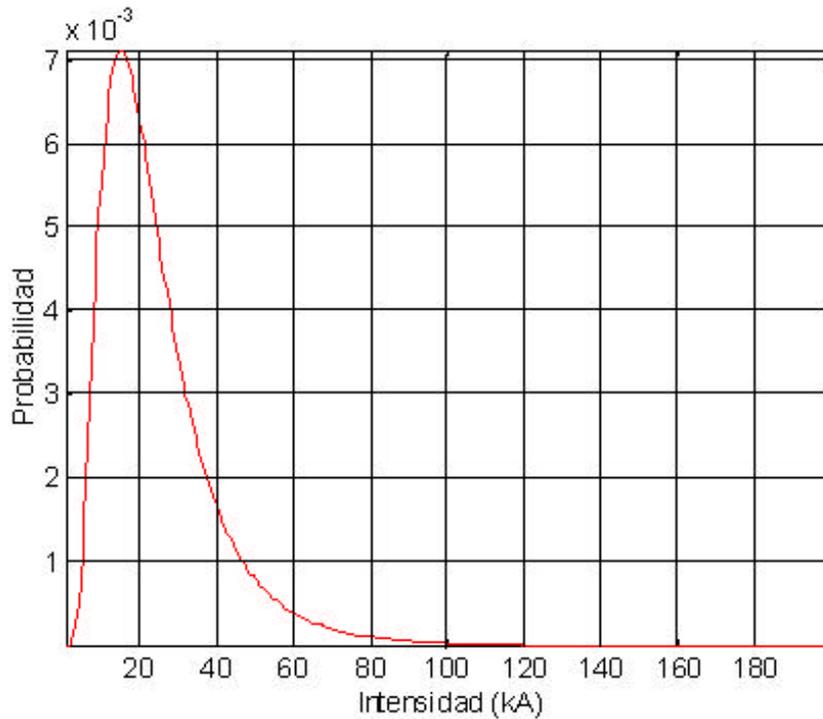


Figura 3.10. Función densidad de probabilidad conjunta para I con  $t_f = 2 \mu s$ .

### 3.6. DATOS REPRESENTATIVOS DE UN RAYO

Los datos más representativos de un rayo pueden ser resumidos de la siguiente forma

- Corriente de pico: 1 a 400 kA, 30 kA es el más representativo
- Tiempo de subida: 1 a 30  $\mu s$ , 2  $\mu s$  es el más representativo
- Tiempo a valor medio: 10 a 250  $\mu s$ , siendo 50  $\mu s$  el valor más representativo
- Descargas por rayo: 1 a 26, valor medio 4.

### 3.7. DENSIDAD DE DESCARGAS

La densidad de descargas a tierra por  $km^2$  y año,  $N_g$ , es otro parámetro importante en el cálculo de contorneamientos. Éste es un dato mal conocido y puede variar mucho en años consecutivos para una misma región. Las estadísticas mejor conocidas hacen referencia al número de días de tormenta al año,  $T_d$ , o al número de horas de tormenta al año,  $T_h$ , que se registran en un punto determinado. Ambos valores son conocidos como nivel cerámico. El valor de  $N_g$  se puede aproximar a partir del nivel cerámico mediante cualquiera de las siguientes expresiones

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25} \tag{3.8}$$

$$N_g = 0.054 \cdot T_h^{1.1} \tag{3.9}$$

En general esta aproximación no es suficientemente precisa, no existiendo una buena correlación entre la densidad de descargas a tierra y el nivel cerámico. Lo más fiable es utilizar las estadísticas sobre localización y mediciones directas de las descargas. Las redes de localización de rayos proporcionan la fecha, hora, magnitud, polaridad y número de descargas de cada rayo. Puesto que esta metodología es relativamente reciente y la densidad de descargas a tierra puede variar considerablemente de un año para otro, los datos actuales no son fiables. Para estimar el comportamiento de una línea se debe tener en cuenta que la densidad de descargas a tierra varía aproximadamente entre 0 y 20, y que debido a la variación que puede haber entre dos años consecutivos, los mapas de descargas se deben elaborar tomando el promedio de al menos 5 años consecutivos.

### 3.8. VELOCIDAD DE RETORNO DEL RAYO

Las tensiones inducidas por rayos que caen a tierra en las cercanías de la línea pueden ser un grave problema en líneas con bajos niveles de aislamiento, encontrándose la magnitud de estas sobretensiones en función de la velocidad de retorno del rayo. Por tanto, la velocidad es otro parámetro significativo a ser incluido en el estudio. Sin embargo, los datos experimentales para la velocidad de retorno son escasos. Además, este parámetro puede tener una dependencia geográfica, y las características de los rayos disparados artificialmente pueden ser diferentes de los rayos naturales.

Varios autores han propuesto una relación entre la intensidad máxima y la velocidad de retorno de un rayo, como la que muestra la siguiente expresión

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{W}{I}}} \quad (3.10)$$

donde  $v$  es la velocidad de retorno del rayo en m/s,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío en m/s,  $W$  es una constante, e  $I$  es la intensidad de pico de la descarga en kA. Esta relación es uno de los principios en los que se basa el Modelo Electrogeométrico que será estudiado en el próximo capítulo, y por tanto debe ser tenida en cuenta en el cálculo de aquellas tensiones en las que  $v$  intervenga como parámetro. No existe consenso entre autores sobre los valores del parámetro  $W$ , por lo que se han propuesto valores muy diferentes. Por esta razón, en los estudios en los que la velocidad y la intensidad máxima de una descarga vengan relacionados mediante la expresión anterior, se emplearán valores del parámetro  $W$  entre 50 y 500.