

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Análisis del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica Industrial en Electricidad

AUTOR: Miguel Ángel Jurado Manchado. **DIRECTOR:** Francisco González Molina.

FECHA: Septiembre / 2013.

Índice

1. Ir	ntroducción	1
2. 01	bjetivos	6
3. De	escripción física del rayo. Parámetros	7
3.1	l Introducción	7
3.2	2 Proceso de descarga de una nube	7
3.3	3 Técnicas de adquisición de datos	0
3.4	4 Distribución estadística de los parámetros del rayo	0
•	3.4.1 Función densidad de probabilidad y Función de probabilidad acumulada. 1 variable	1
	3.4.2 Función densidad de probabilidad y función de probabilidad acumulada. 2 variables	4
	Densidad de probabilidad:	14
3.5	5 Forma de onda típica	17
	3.5.1 Primera descarga de retorno	17
	3.5.2 Descargas subsiguientes	20
	3.5.3 Descargas positivas	21
3.6	5 Velocidad de retorno del rayo	22
3.7	7 Densidad de descargas	22
4. Co	omportamiento de las líneas aéreas eléctricas de distribución frente al rayo	24
4.1	l Introducción	24
4.2	2 Localización del impacto de la descarga tipo rayo	24
	4.2.1 Líneas sin cable de tierra	26
	4.2.2 Líneas con cable de tierra	27
4.3	3 Nivel de aislamiento de la línea de distribución	30
4.4	4 Descargas directas	31

4.4.1 Comportamiento del conductor de fase	31
4.4.2 Comportamiento del cable de tierra	32
4.4.3 Sobretensiones por descargas directas	33
4.4.4 Consideraciones adicionales para impactos directos	39
4.5 Descargas Indirectas	43
4.5.1 Métodos de acoplamiento	43
4.5.2 Sobretensiones por descargas indirectas	45
5. Nivel de aislamiento. Mejora e influencia	49
5.1 Tensión crítica de contorneamiento, CFO, aislamiento combinado en serie	49
5.2 Consideraciones prácticas	51
5.3 Protección con cable de tierra de líneas de distribución	53
5.4 Ángulo de apantallamiento	54
5.5 Requerimientos de aislamiento	55
5.6 Efecto de las puestas a tierra y el nivel de aislamiento	55
6. Cálculo de sobretensiones	57
6.1 Estudio sistemático paramétrico	57
6.1.1 Introducción	57
6.1.2 Análisis en líneas sin cable de tierra	58
6.1.3 Análisis de líneas con cable de tierra	64
6.2 Cálculo de la tasa de contorneamientos en líneas aéreas de distribución	73
6.2.1 Introducción	73
6.2.2 Cálculo sistemático	76
7. Conclusiones	83
8. Bibliografía	84

Entendemos que hay una sobretensión en un sistema si se presenta un exceso circunstancial en la tensión, variable en el tiempo, cuyo valor máximo es superior al valor máximo de la tensión nominal del sistema.

Existen muchas razones por las que se puede originar una sobretensión en una red de potencia, es por ello que el estudio de las sobretensiones se realiza atendiendo al origen, al tipo de proceso transitorio y al tiempo de duración. Podríamos distinguir entre 4 tipos de sobretensiones:

1. Sobretensiones de funcionamiento o maniobra

Un cambio brusco en las condiciones de funcionamiento establecidas de una red eléctrica provoca los fenómenos transitorios. Se trata por lo general de ondas de sobretensión de oscilación amortiguadas o de alta frecuencia (*Figura 1*). Se dice que presentan un frente lento: su frecuencia varía de varias decenas a varios cientos de kHz.

Las sobretensiones de funcionamiento o maniobra pueden estar producidas por lo siguiente:

- Sobretensiones de dispositivos de desconexión debido a la apertura de los dispositivos de protección (fusibles, interruptor automático), y la apertura o el cierre de los dispositivos de control (relés, contactores, etc.).
- Las sobretensiones de los circuitos inductivos debidas a arranques o paradas de motores, o la apertura de transformadores, como los centros de transformación de MT/BT.
- Las sobretensiones de circuitos capacitivos debidas a la conexión de baterías de condensadores a la red
- Todos los dispositivos que contienen una bobina, un condensador o un transformador en la entrada de alimentación: relés, contactores, televisores, hornos eléctricos, filtros, etc.
- 2. Sobretensiones transitorias de frecuencia industrial

Estas sobretensiones presentan las mismas frecuencias que la red: 50, 60 o 400 Hz (*Figura 2*).

Sobretensiones transitorias de frecuencia industrial las encontramos:

• Producidas por defectos de aislamiento de fase/masa o fase/tierra en una red con un neutro aislado, o por el defecto del conductor neutro.

- Debidas a un defecto en el cable. Por ejemplo, un cable de media tensión que cae en una línea de baja tensión.
- Si el arco de un spark-gap de protección de media o alta tensión produce un aumento del potencial de tierra durante la acción de los dispositivos de protección. Estos dispositivos de protección siguen ciclos de conmutación automática, lo que recreará un defecto si persiste.



Figura 1. Sobretensiones de maniobra y descarga atmosférica



Figura 2. Sobretensión a frecuencia industrial

3. <u>Sobretensiones producidas por descargas electrostáticas</u>

En un entorno muy seco, se acumulan cargas eléctricas y crean un campo electrostático muy fuerte. Por ejemplo, una persona que camine sobre una moqueta con suelas aislantes se cargará eléctricamente con una tensión de varios kilovoltios. Si la persona camina cerca de una estructura conductora, desprenderá una descarga eléctrica en un periodo de tiempo de pocos nanosegundos. Si la estructura contiene elementos electrónicos sensibles, como un ordenador, se pueden destruir sus componentes o placas de circuitos.

4. <u>Sobretensiones de origen atmosférico</u>

Son debidas a una descarga atmosférica, rayo, tienen una duración muy corta y una amplitud que puede ser varias veces la tensión máxima nominal (*Figura 1*).

La corriente de un rayo además de una inducción importante y efectos de sobretensión, produce los mismos efectos que cualquier corriente de baja frecuencia en un conductor:

- Efectos térmicos: fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule, debido a la circulación de la corriente.
- Efectos electrodinámicos: cuando las corrientes de los rayos circulan en conductores paralelos, provocan fuerzas de atracción o repulsión entre los cables, lo que produce roturas o deformaciones mecánicas (cables aplastados).
- Sobretensiones conducidas tras un impacto en las líneas telefónicas o en las líneas aéreas eléctricas.
- Sobretensiones inducidas por el efecto de radiación electromagnética del canal del rayo que actúa como antena en varios kilómetros y lo cruza una corriente de impulso considerable.
- El aumento del potencial de tierra por la circulación de la corriente del rayo por la tierra. Esto explica las caídas de rayos indirectas por tensión de paso y los defectos de los equipos.

La importancia de las sobretensiones atmosféricas crece conforme disminuye la tensión nominal de los componentes afectados por el rayo. El valor de las sobretensiones que se pueden producir en una red de distribución originadas por un rayo es tan elevado frente al valor de la tensión nominal de la red que tanto el nivel de aislamiento de los componentes como la selección y coordinación de protecciones se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas. En general, el nivel de las sobretensiones de origen interno es inferior o muy inferior al nivel de aislamiento de los componentes de una red de distribución, siendo el número de averías originadas por una sobretensión de este tipo mucho más reducido que el originado por sobretensiones atmosféricas directas o inducidas por el rayo. Un rayo puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en algún otro equipo.

Este proyecto se enmarca en la evaluación de líneas de distribución frente a sobretensiones de origen atmosférico.

La aparición de una sobretensión de origen atmosférico en una línea aérea puede ser debida a uno de los mecanismos siguientes:

- La descarga cae sobre un cable de tierra o un poste, en ambos casos una parte de la corriente del rayo termina propagándose a tierra donde originará sucesivas reflexiones que pueden dar lugar a una tensión superior a la rigidez dieléctrica del aislamiento entre el poste y alguno de los conductores de fase.
- la descarga cae sobre un conductor de fase debido a un apantallamiento insuficiente del cable de tierra o a la inexistencia de éste; se produce una falta si la onda de tensión supera la rigidez dieléctrica del aislamiento.
- La descarga cae en las cercanías de una línea aérea, pudiendo inducir en ésta tensiones superiores al nivel de aislamiento.

El estudio del comportamiento de las líneas de distribución frente al rayo ha sido objeto de gran atención durante los últimos años y existe literatura centrada exclusivamente en este campo. Sin embargo, todavía existen muchos puntos sobre los que no hay un conocimiento suficientemente preciso; probablemente, los más importantes sean la propia naturaleza del rayo y los principales parámetros que describen su comportamiento.

Este proyecto está orientado al análisis de sobretensiones originadas por el rayo en líneas aéreas de distribución, con y sin apantallamiento. El objetivo es calcular la tasa de contorneamientos en función de los parámetros más característicos del rayo y de la línea, así como de la actividad atmosférica de la zona por donde transcurre la línea.

El documento ha sido estructurado de la siguiente forma:

- En el Capítulo 2 se resumen los antecedentes y los objetivos de este proyecto.
- En el Capítulo 3 se presenta una introducción al proceso de descarga de una nube, y se detallan los parámetros más importantes de un rayo.
- En el Capítulo 4 se presenta la metodología empleada para el análisis del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo.
- El Capítulo 5 está dedicado a los niveles de aislamiento en las líneas de distribución y las consideraciones por parte del IEEE para mejorarlo.
- En el Capítulo 6 se realizará el cálculo de sobretensiones en una línea sin y con apantallamiento mediante un análisis sistemático paramétrico y se calcularan las tasas de contorneamientos tanto para líneas sin apantallamiento como para líneas apantalladas.

- El Capítulo 7 presenta las conclusiones más importantes de los datos arrojados por los cálculos realizados en el Capítulo 6 y en referencia conceptual al resto de capítulos.
- El Capítulo 8 incluye la bibliografía empleada y/o de interés en la realización del presente proyecto.

2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es ofrecer una visión algo más específica sobre el efecto de las descargas atmosféricas en las líneas aéreas de distribución, para ello no obstante se ofrecerá una visión panorámica de la problemática que representan dichas descargas debido a la complejidad y constante evolución de las diferentes metodologías y/o herramientas para su análisis.

El principal objetivo será el cálculo de la tasa de contorneamientos por sobretensiones de origen atmosférico en líneas de distribución sin y con apantallamiento. Este cálculo se realizará empleando una metodología sistemática basada en el modelo electrogeométrico y el cálculo de sobretensiones.

Las diferentes operaciones y gráficos han sido realizadas o implementadas usando el software MatLab.

Se debe mencionar las limitaciones del presente proyecto:

- En el cálculo de la tasa de contorneamientos no se ha tenido en cuenta la tensión de la línea a frecuencia industrial.
- Todos los cálculos se han realizado asumiendo una conductividad del terreno constante.
- La impedancia de puesta a tierra de los postes se ha asumido una resistencia de valor constante.
- En el cálculo de las sobretensiones inducidas por descargas a tierra se ha utilizado un modelo de línea ideal con parámetros independientes de la frecuencia.

3. Descripción física del rayo. Parámetros

3.1 Introducción

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 el 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 rayos entre nube y tierra, ver *Figura 3*. Las descargas negativas forman el 90% de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta (*tipo a*); menos del 10% de las descargas son positivas (*tipo b*). También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube (*tipo c y d*), 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 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.



Figura 3. Tipos de rayo.

Los rayos procedentes de una nube tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de esta área el impacto es casi aleatorio. Existe una probabilidad alrededor del 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.

3.2 Proceso de descarga de una nube

La Figura 4 describe el proceso completo de un rayo. En una primera fase, podemos observar como el canal (también llamado líder y/o trazador) 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 los 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 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 µs. 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, estas descargas subsiguientes a la primera descarga de retorno producen picos de corriente del orden de 12 kA. La *Tabla 1* muestra la posible tasa de descargas por rayo. En la *Figura 5* podemos observar un ejemplo cuantificado de un rayo con 11 descargas de retorno.



Figura 4. Proceso del rayo.

Los rayos de polaridad positiva 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 suficiente conocimiento sobre descargas positivas como para decir que esto es siempre una condición necesaria.

Número de impactos por rayo	Frecuencia de ocurrencia (%)
1	45
2	14
3	9
4	8
5	8
6	4
7	3
8	3
9	2
≥10	4



Figura 5. Corriente de un rayo negativo descendente con 11 descargas de retorno.

3.3 Técnicas de adquisición de datos

La recopilación de datos referentes a los parámetros del rayo se logra de una mejor forma mediante mediciones directas de un rayo *real*.

La recopilación de datos puede ser acelerada utilizando la técnica del *rayo disparado*, la cual consiste en disparar un cohete arrastrando un fino hilo conductor hacia una nube cargada. El cohete será alcanzado por un rayo cuando se acerque a la nube cargada y el hilo conductor se evaporará por las altas temperaturas que envuelven al proceso, simulando así el canal de un rayo. La primera descarga de retorno no puede ser simulada por un *rayo disparado*, simula la subsiguiente descarga de retorno. En la *Figura 6* podemos ver una imagen del montaje y resultado de esta técnica del *rayo disparado*.

Como las estructuras altas suelen ser golpeadas por los rayos con mayor frecuencia, tradicionalmente la primera descarga de retorno ha sido medida mediante la instalación de transductores de corriente, ya sea en la parte superior o la parte inferior de torres altas. El registro del transductor de corriente queda grabado en un dispositivo externo. La magnitud de la corriente de la primera descarga de retorno también es registrada mediante enlaces magnéticos, los cuales son pequeñas cajas de alta remanencia formadas por láminas de acero de unos 3 cm de largo, colocadas en varios lugares sobre los cables de guarda y los apoyos de las torres de las líneas. La corriente fluye a través de estos enlaces magnéticos y puede ser estimada a partir de la magnetización de los mismos. No obstante, dichas mediciones son descartadas por falta de fiabilidad. El pico de intensidad de la primera descarga de retorno también ha sido calculado mediante la medición del campo magnético radiado por dicha descarga. La relación entre el pico de Intensidad, I_p , y el campo eléctrico radiado, E_p , se obtiene del modelo *línea de transmisión* para un rayo, *sin perdidas en tierra*:

$$I_{pico} = -\frac{2\pi\epsilon_0 c^2 D}{v} E_{pico}$$
(1)
$$E_{pico} = c B_{pico}$$

Donde:

v: Es la velocidad de la descarga de retorno (m/s) *c*: Es la velocidad de la luz en el vacío, $3 \cdot 10^8$ m/s *D*: Es la distancia desde el rayo a la torre (m) *B*_{pico}: Es el valor pico del campo magnético inducido (T)

3.4 Distribución estadística de los parámetros del rayo

Mediante la recopilación de datos referentes a los parámetros del rayo en mástiles, chimeneas, torres etc., se ha podido comprobar y aceptar que la distribución de los parámetros del rayo pueden ser aproximados y responden ante una distribución logarítmica normal, donde la variación estadística del logaritmo de una variable aleatoria, *x*, sigue la distribución normal o gaussiana.

3. Descripción física del rayo. Parámetros



Figura 6. Técnica Rayo Disparado.

3.4.1 Función densidad de probabilidad y Función de probabilidad acumulada. 1 variable

Densidad de probabilidad:

La función densidad de probabilidad, p(x), vendrá dada por:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \mathbf{x} \sigma_{\ln \mathbf{x}}} \exp\left[-0.5 \left(\frac{\ln \mathbf{x} - \ln \mathbf{x}_{m}}{\sigma_{\ln \mathbf{x}}}\right)^{2}\right]$$
(2)

Donde:

 σ_{lnx} : Es la desviación estándar del logaritmo de la variable x x_m : Es la media de la variable x



Figura 7. Función densidad de probabilidad de I, primera descarga retorno negativa.

Probabilidad acumulada:

Substituyendo:

 $u = (\ln x - \ln x_m) / (\sqrt{2}\sigma_{\ln x})$

La probabilidad acumulada, $P_{c(x)}$, permite calcular la probabilidad de que el parámetro, x, sea igual o supere un valor determinado x_0 , y es dada integrando entre u y ∞ , resultando:

$$P_{c}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{u_{0}}^{\infty} e^{-u^{2}} du = 0, \text{Serfc}(u_{0})$$
(3)

Siendo erfc la función error complementaria:

$$\operatorname{erfc}(\mathbf{x}) = 1 - \operatorname{erf}(\mathbf{x}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\mathbf{x}}^{\infty} e^{-u^{2}} du$$
 (4)

Ejemplo: Si la intensidad crítica de contorneamiento para una línea aérea es de 20 kA, y según la *Tabla 2*, I_{pm} =31.1 kA y σ =0.48:

$$u_{0} = \frac{\ln I_{c} - \ln I_{pm}}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{2,9957 - 3,4372}{\sqrt{2} \times 0,48} = -0.6504$$

$$P_{c}(I_{p} \ge 20 \text{kA}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-0.6504}^{\infty} e^{-u^{2}} du = 0,8211$$

Así pues, la probabilidad de que la corriente de una primera descarga de retorno negativa sea superior a 20 kA es 82,11%.

Parámetro	<i>M</i> , Media	σ, Desviación estándar logarítmica	<i>M</i> , Media	σ, Desviación estándar logarítmica						
Tiempo de frente (µs)										
$t_{d10/90} = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576	0.75	0.921						
$t_{d30/90} = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553	0.67	1.013						
$t_m = I_F / S_m$	1.28	0.611	0.308	0.708						
	Р	endiente (kA/µs)								
S _m , Máxima	24.3	0.599	39.9	0.852						
S ₁₀ , al 10%	2.6	0.921	18.9	1.404						
S _{10/90} , 10-90%	5.0	0.645	15.4	0.944						
S _{30/90} , 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967						
	Co	orriente pico (kA)								
I _b inicial	27.7	0.461	11.8	0.530						
I_F , final	31.1	0.484	12.3	0.530						
Ratio, I_I/I_F	0.9	0.230	0.9	0.207						
	C)tros parámetros								
Tiempo cola-Valor medio t _n	77.5	0.577	30.2	0.933						
(µs)										
Número de impactos	1	0	2.4	0.96						
por rayo										
Carga-impacto, Q_I	4.65	0.882	0.938	0.882						
(Coulomb)										
$[I^2 dt ((\mathbf{kA})^2 \mathbf{s})]$	0.057	1.373	0.0055	1.366						
Intervalo impactos (ms)	_	—	35	1.066						

Tabla 2. Parámetros para la corriente del rayo recomendados.



Figura 8. Descarga atmosférica, Probabilidad I \geq I_0

3.4.2 Función densidad de probabilidad y función de probabilidad acumulada. 2 variables

Densidad de probabilidad:

La función densidad de probabilidad conjunta para 2 parámetros, $x \in y$, se podrá expresar:

$$p(x,y) = \frac{\exp\left[\frac{-0.5}{1-\rho_{c}^{2}}(f_{1}+f_{2}+f_{3})\right]}{2\pi x y \sigma_{1nx} \sigma_{1ny} \sqrt{1-\rho_{c}^{2}}}$$
(5)

Donde:

$$f_{1} = \left(\frac{\ln x - \ln x_{m}}{\sigma_{\ln x}}\right)^{2}$$

$$f_{2} = 2\rho_{c} \left(\frac{\ln x - \ln x_{m}}{\sigma_{\ln x}}\right) \left(\frac{\ln y - \ln y_{m}}{\sigma_{\ln y}}\right)$$

$$f_{3} = \left(\frac{\ln y - \ln y_{m}}{\sigma_{\ln y}}\right)^{2}$$

 ρ_c : Es el coeficiente de correlación.

Si *x* e *y*, están independientemente distribuidas, entonces $\rho_c=0$, y p(x,y)=p(x)p(y).

Probabilidad acumulada:

La probabilidad acumulada de que $x \ge x_0$ e $y \ge y_0$ es:

$$P_{c}(x \ge x_{0}, y \ge y_{0}) = (0, 5erfc(u_{x_{0}})) (0, 5erfc(u_{y_{0}})) = 0, 25erfc(u_{x_{0}})erfc(u_{y_{0}})$$
(6)

Donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\mathbf{x}_0} &= (\ln \mathbf{x}_0 - \ln \mathbf{x}_m) / (\sqrt{2}\sigma_{\ln \mathbf{x}}) \\ \mathbf{u}_{\mathbf{y}_0} &= (\ln \mathbf{y}_0 - \ln \mathbf{y}_m) / (\sqrt{2}\sigma_{\ln \mathbf{y}}) \end{aligned}$$

De forma similar, si $x < x_0$ e $y \ge y_0$, la probabilidad acumulada conjunta es:

$$P_{c}(x < x_{0}, y \ge y_{0}) = (1 - 0, 5erfc(u_{x_{0}})) \cdot (0, 5erfc(u_{y_{0}}))$$
(7)

La función densidad de probabilidad condicional de y para un valor dado $x(x=x_0)$ puede ser obtenida de la siguiente forma:

$$p(y|x = x_0) = \frac{p(x,y)}{p(x)}$$
 (8)

$$p(y|x = x_0) = \frac{\exp\left(-\frac{(\ln y - b)^2}{2\sigma^2}\right)}{y\sigma\sqrt{2\pi}}$$
(9)

Donde:

$$b = \ln y_{m} + \rho_{c} \frac{\sigma \ln y}{\sigma \ln x} (\ln x_{0} - \ln x_{m})$$

$$\sigma = \sigma_{\ln y} \sqrt{1 - \rho_{c}^{2}}$$

Esta nueva distribución logarítmica normal de y tiene como valor medio, y_{mc} , el cual es el antilogaritmo de *b* y una nueva desviación estándar.

Para la probabilidad acumulada condicional de y desde y_0 hasta ∞ :

$$P_{c}(y \ge y_{0} | x = x_{0}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{u_{0}}^{\infty} e^{-u^{2}} du = erfc(u_{0})$$
(10)

Siendo:

$$u = (\ln y - b) / \sigma \sqrt{2}$$
$$u_0 = (\ln y_0 - b) / \sigma \sqrt{2}$$

No obstante, si el condicional es para x dentro de un rango, $x_1 < x < x_2$, entonces la ecuación (8) debe ser integrada:

$$P_{c}(y \ge y_{0}) | x_{1} < x < x_{2}) = \frac{\int_{x_{1}}^{x_{2}} dx \int_{y_{0}}^{\infty} p(x, y) dy}{\int_{x_{1}}^{x_{2}} p(x) dx} = \frac{\sum_{x_{1}}^{x_{2}} \Delta x \sum_{y_{0}}^{\infty} p(x, y) \Delta y}{0.5(erf(u_{2}) - erf(u_{1}))}$$
(11)

Ejemplo:

En este ejemplo, con un intensidad crítica de contorneo de 20 kA, se calcula la probabilidad de que la intensidad pico de la descarga de retorno sea igual o mayor a 20 kA, $I_p \ge 20$ kA, para un tiempo de frente dado de 1 µs, $t_f = 1$ µs.

Asumiendo los valores I_m =31.1 kA, σ_{lnIp} =0.48, t_{fm} =3,83 µs y σ_{lntf} =0.55, aplicaremos la ecuación (10):

Para
$$\rho_c = 0$$

 $b = \ln(31,1) = 3,43$
 $\sigma = 0,48$
 $u_0 = (\ln(20) - 3,43) / 0,48\sqrt{2} = -0.6397$
 $P_c(I_p \ge 20 \text{kA} | t_f = 1 \mu s) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-0.6397}^{\infty} e^{-u^2} du = 0.8171 = 81,71\%$

Se puede observar como al no existir correlación alguna, el resultado es *idéntico* al primer ejemplo salvaguardando la inexactitud por el manejo de decimales.

Para $\rho_c = 0.47$

$$b = \ln(31, 1) + 0,47 \frac{0,48}{0,55} (\ln(1) - \ln(3,83)) = 2,88$$

$$\sigma = 0,48\sqrt{1-0,47^{2}} = 0.42$$

$$u_{0} = (\ln(20) - 2,88) / 0,42\sqrt{2} = 0.19$$

$$P_{c}(I_{p} \ge 20kA | t_{f} = 1\mu s) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{0,19}^{\infty} e^{-u^{2}} du = 0.3941 = 39,41\%$$

Para $\rho_c = 0.90$

$$b = \ln(31,1) + 0,90\frac{0,48}{0,55}(\ln(1) - \ln(3,83)) = 2,38$$

$$\sigma = 0,48\sqrt{1 - 0,9^2} = 0,21$$

$$u_0 = (\ln(20) - 2,38)/0,21\sqrt{2} = 2,07$$

$$P_c(I_p \ge 20kA | t_f = 1\mu s) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{2,07}^{\infty} e^{-u^2} du = 0.0017 = 0,017\%$$

Este análisis es aplicable para estimar las tasas de interrupción por rayos a tierra, cercanos a la línea, y también para las interrupciones por flameo inverso.

3.5 Forma de onda típica

A continuación se describirá brevemente la forma de onda y sus peculiaridades para las descargas negativas (primera descarga de retorno y descargas subsiguientes) y para las descargas positivas. El marcado carácter aleatorio de los rayos hace que para su estudio la forma de onda típica a tener en cuenta sea la de la primera descarga de retorno asumiendo una polaridad negativa (no obstante se representa gráficamente como una onda de polaridad positiva en prácticamente toda la literatura existente), así lo reflejan *IEEE* y *CIGRE*.

3.5.1 Primera descarga de retorno

La primera descarga de retorno se caracteriza por tener un rápido incremento hasta el pico de la función, en apenas unos μ s, y por un posterior decrecimiento relativo que alcanza la mitad del valor pico en unas decenas de μ s.

La forma de onda de la corriente, vendrá especificada por el tiempo desde su valor inicial hasta su valor pico (t_f , tiempo de frente). La cola o decrecimiento en la función de la corriente tendrá menos importancia en el cálculo del voltaje generado. El voltaje generado es en función del pico de corriente, tanto para rayos directos como indirectos.

En la *Figura 9* se puede observar la onda estadísticamente aceptada y reconocida por IEEE y CIGRE, en la *Tabla 2* podemos encontrar los valores asociados a la misma.

Actualmente la ecuación aceptada para describir la corriente de retorno del rayo viene expresada de la siguiente forma:

$$i(t) = \frac{I_{p}}{\eta} \cdot \frac{k_{s}^{n}}{1 + k_{s}^{n}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{2}}}$$
(12)

Donde:

I_p: Es la corriente pico de la descarga (kA) η: Es el factor de corrección de la corriente $k_s = t/\tau_1$ τ_1, τ_2 : Son constantes de tiempo que determinan la subida y bajada respectivamente *n*: Es el factor pendiente de la corriente (kA/μs)

En la actualidad el modelaje de la corriente de una descarga atmosférica se realiza mediante software especializado como el *LIOV code*, el cual es un método implementado por miembros del IEEE tomando como referencia la suma de dos funciones con estructura igual a la ecuación (12) (función de *Heidler*) más una función doble exponencial.

En la literatura actual, algunas veces en estudios sistemáticos y con el objetivo de ofrecer una aproximación, la forma de onda de la corriente se modela de manera simplificada utilizando una forma de onda en doble rampa:

$$i(t) = \alpha_1 \cdot t \cdot u(t) - \alpha_2 \cdot (t - tf) \cdot u(t - tf) = i_1(t) + i_2(t)$$

$$\alpha_1 = \frac{I}{t_f}; \alpha_2 = \frac{2 \cdot t_h - t_f}{2 \cdot t_f \cdot (t_h - t_f)} \cdot I$$
(13)

Donde:

u(t),u(t-tf): función escalón unidad I: intensidad pico de la corriente (kA) t_f : tiempo de frente de la onda de la corriente del rayo (µs) t_h : tiempo al valor medio de la corriente pico del rayo (µs) 3. Descripción física del rayo. Parámetros



Figura 9. Forma de onda típica primera descarga retorno.



Figura 10. Forma de onda de descarga en doble rampa.

Una forma simplificada para la probabilidad acumulada en la primera descarga de retorno es dada por:

$$P_{c}(> I_{p}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{p}}{31}\right)^{2,6}}$$
 (14)

3.5.2 Descargas subsiguientes

En general, no existe correlación entre la primera descarga y las descargas subsiguientes. El valor medio de las descargas subsiguientes es significantemente menor que el de las primeras descargas de retorno.

Asumiendo su distribución logarítmica normal, los valores propuestos para las descargas subsiguientes son:

$$I_{pm} = 12, 3 \text{ kA;} \sigma_{\ln I_{p}} = 0,5296$$

Y la expresión simplificada de su probabilidad acumulada es:

$$P_{c}(> I_{p}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{p}}{12}\right)^{2,7}}$$
(15)

En la *Figura 11* podemos observar la forma de onda para la primera descarga de retorno así como de una segunda y una tercera descarga. Podemos observar como la primera descarga de retorno tiene una concavidad inicial debida al trazador ascendente, el cual no suele aparecer en las descargas subsiguientes.



Figura 11. Primera descarga (superior), Segunda descarga (medio) y Tercera descarga (abajo).

3.5.3 Descargas positivas

Como ya hemos dicho, menos del 10% de las descargas a tierra son positivas. Estas suelen relacionarse a estructuras altas y estaciones invernales, aunque están sujetas a una gran variabilidad.

El valor medio para este tipo de descargas se sitúa alrededor de los 35 kA, no obstante se han llegado a registrar valores de corriente de hasta 320 kA para este tipo de descargas, teniendo las mismas un 5% de probabilidad de exceder los 250 kA, porcentaje que en el caso de las primeras descargas negativas exceden únicamente los 80 kA. Como podemos ver en la *Figura 12* se han registrado dos tipos de descargas positivas, las primeras con tiempos de frente y formas de onda parecidas a la de las primeras descargas de retorno, y las segundas con unos tiempos de frente mucho más prolongados.



Figura 12. Formas de onda descargas positivas. a) tipo "negativa", b) tipo prolongado.



Figura 13. Descarga positiva, 320 kA.

3.6 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 entre otros factores. Se ha observado que la velocidad de retorno de un rayo desciende a medida que el rayo progresa hacia la nube, es por esto que la velocidad medida en un rayo con un canal largo será inferior a la medida en un rayo con un canal más corto.

La expresión para la velocidad de retorno del rayo es la siguiente:

$$v = 0, 5 \cdot erf(0, 016 \cdot I_p)$$
 (16)

3.7 Densidad de descargas

La densidad de descargas tipo rayo a tierra por km² y año, N_g , 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 ceraúnico. El valor de N_g se puede aproximar a partir del nivel ceraúnico mediante cualquiera de las siguientes expresiones:

$$N_{\rm q} = 0,04 \cdot T_{\rm d}^{1,25} \tag{17}$$

$$N_{\rm q} = 0,054 \cdot T_{\rm h}^{1,1} \tag{18}$$

En general esta aproximación no es suficientemente precisa, no existiendo una buena correlación entre la densidad de descargas a tierra y el nivel ceraúnico. Lo más fiable es utilizar las estadísticas sobre localización y mediciones directas de descargas.

En la actualidad existen redes de localización de rayos, basadas en sistemas de sensores ópticos y satélites, el más conocido de ellos: *NLDN*, la red nacional de detección de rayos de Estados Unidos, y propiedad de la empresa *Vaisala*. Estos sistemas pueden ofrecer datos como: la fecha, hora, magnitud, polaridad y número de descargas de un rayo; como ejemplo, en la siguiente *Figura 14*, podemos ver un mapa de densidad de descargas obtenido por el *NLDN*. La cobertura de espacio terrestre de estos sensores es casi total y homogénea, no obstante para las zonas que queden fuera de ella se recomienda aplicar la siguiente corrección:

$$N_{\rm q} = N_{\rm t} / 3$$
 (19)

Donde:

 $N_{g=}$ Número de descargas tipo rayo a tierra (rayos/km²/año)

 N_t = Total de descargas tipo rayo a tierra (rayos/km²/año) obtenido mediante el sistema de sensores ópticos y satélite.



Figura 14. N_t , África y Eurasia.

4. Comportamiento de las líneas aéreas eléctricas de distribución frente al rayo

4.1 Introducción

Los rayos o descargas atmosféricas son una de las mayores causas de contorneamiento en líneas aéreas de distribución. Una descarga atmosférica puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en otro equipo.

Los daños causados por descargas atmosféricas en la líneas aéreas de distribución, son debidos a descargas directas sobre los conductores de fase o sobre los neutros o cables de guarda, en caso de existir, o son debidos a descargas indirectas que no impactan directamente en la línea pero alteran el campo electromagnético a su alrededor, induciendo sobretensiones en la misma (*Figura 15*). El estudio de estas últimas sobretensiones inducidas por impactos indirectos es de mayor importancia, debido a su complejidad y a que el número de averías provocadas por estas es muy superior al número de averías provocadas por estas conductores.



Figura 15. Influencia de descargas atmosféricas en líneas de distribución

4.2 Localización del impacto de la descarga tipo rayo

El modelo más empleado para la localización del impacto de una descarga tipo rayo, es el Modelo Electrogeométrico, *EGM*.

El objetivo de este modelo es determinar el punto de impacto de una descarga teniendo en cuenta su intensidad máxima de corriente y la localización del canal de esta descarga, que se supone tiene una trayectoria vertical. Al acercarse una descarga a tierra hay un momento en que se supera la rigidez dieléctrica del aire y se produce el salto hacia el objeto más cercano, que puede ser un árbol, una línea o la misma tierra. La distancia de ruptura, o distancia a la que salta el arco, depende de la magnitud de la corriente de la descarga. Sin embargo, en general la distancia de ruptura de un conductor en la cima de una torre difiere de la distancia de ruptura a la tierra. Esto es obvio dado que la pendiente de una descarga con electrodos punta-plano (líder descendente que conecta con la tierra) difiere de la pendiente de una descarga con electrodos punta-punta (el líder descendente conecta a la torre). Así, en general, existen al menos dos distancias de ruptura, una a los conductores de fase o los cables de tierra r_c , y otra al terrero o tierra r_g , ver *Figura 16*.



Figura 16. Modelo electrogeométrico para un solo conductor

Para la mayoría de las aplicaciones se acepta la siguiente relación simplificada:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}^{\mathsf{b}} \tag{20}$$

Siendo $A \neq b$ dos constantes que dependen del objeto y la corriente de descarga, ver *Tabla 3*.

La sobretensión originada por una descarga origina contorneamiento si su valor es superior al nivel de aislamiento. Al menor valor de la intensidad de corriente que causa contorneamiento se le denomina intensidad de corriente crítica (I_c). Según *CIGRE* y *IEEE*, la descarga de corriente más baja es 3 kA. Sin embargo, otros investigadores creen más razonable bajar hasta valores de 1 o 2 kA. Sin embargo, el número de descargas con picos de corriente entre 0 y 3 kA es muy reducido frente al número de descargas totales que impactan en una línea aérea.

	Distancia a tierra		Distancia a un cable				
Expresiones	Α	b	Α	b			
Wagner	14,2	0,32	14,2	0,32			
Anderson	6,4, 8 ó 10	0,75	8	0,65			
IEEE 1243-1997	*1	0,65	10	0,65			
IEEE 1410-2011	*2		10	0,65			
$A_{h<40} = 3,6+1,7\ln(43-h)$							
$*1 A_{h>40} = 5,5$							
*2 Distancia a tierra, $r_g = 0.9 \cdot r_s$							

Tabla 3. Constantes para la distancia de ruptura

4.2.1 Líneas sin cable de tierra

La aplicación del modelo electrogeométrico para determinar el punto de impacto final de una descarga atmosférica, con intensidad pico I, en una situación como la que muestra la *Figura 16* se construye de la siguiente forma:

- 1. Se calculan las distancias r_g y r_c para una corriente específica *I*, según (20).
- 2. Se traza una línea paralela a la tierra con una separación r_g .
- 3. Se traza un arco de radio r_c y centro el punto *M* hasta que se corte con la línea paralela trazada en el paso anterior.

Cualquier descarga entre A y B terminará en el conductor y cualquier descarga que llegue a la izquierda de A o a la derecha de B terminará impactando en tierra.

La zona entre A y B de la Figura 16, la zona de impacto al conductor, viene determinada por $[-D'_{g}, +D'_{g}]$ y se puede determinar como sigue:

$$D'_{g} = \sqrt{r_{c}^{2} - (r_{g} - y)^{2}}$$
(21)

$$D'_{g} = r_{c} \cdot \cos\theta \tag{22}$$

Siendo:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_{\rm g} - y}{r_{\rm c}}$$

Como el conductor M está separado una distancia a del origen de coordenadas, se tiene:

$$X = a + D'_g$$
(23)

Donde *X* es la distancia desde la referencia 0 hasta el final de la zona de influencia del conductor *M*. Es evidente que $X=D'_g$ si se sitúa el centro de coordenadas en el eje del conductor.

Si se tienen *n* conductores en diferentes posiciones con separaciones a_i y alturas y_i , las ecuaciones (21, 22, y 23) se pueden generalizar de la siguiente forma:

$$D'_{gi} = \sqrt{r_{c}^{2} - (r_{g} - y_{i})^{2}} \implies D'_{gi} = r_{c} \cdot \cos\theta_{i}$$
(24)

$$\theta_{i} = \sin^{-1} \frac{r_{g} - Y_{i}}{r_{c}}$$
(25)

$$X_{i} = a_{i} + D'_{gi}$$
⁽²⁶⁾

Conviene tener en cuenta que, independientemente de la altura a la que se encuentren los conductores, puede haber solapamiento entre las zonas de atracción. Por otra parte, para intensidades pico superiores a un determinado valor, el conductor más elevado puede proteger a todos o algunos de los restantes conductores, como se verá a continuación.

4.2.2 Líneas con cable de tierra

4.2.2.1 Un cable de tierra y una fase

En la sección anterior se encontraron dos zonas (zona de impacto y zona de tierra); sin embargo, cuando se tenga que considerar más de un conductor, por ejemplo 1 cable de tierra (*Figura 17.a*) y 1 conductor de fase (*Figura 17.b*). Al tener en cuenta el conductor de fase y el cable de tierra se presenta solapamiento de las zonas como se muestra en la *Figura 18* lo que origina tres zonas: zona protegida (Z_p), zona de falla (Z_f) y zona de tierra.

Los arcos con radio r_c , son dibujados tomando como centro el cable de tierra y un conductor de fase. Además, se construye una línea horizontal paralela a la tierra a una altura r_g . Según el modelo, una descarga con una intensidad pico *I* a la que corresponde un arco de radio r_c :

• Debe terminar en el conductor de fase, "zona de falla" (Z_f), si el canal vertical de la descarga está entre $A ext{ y } B$

4. Comportamiento de las líneas aéreas eléctricas de distribución frente al rayo

- Más allá del punto *B* la descarga terminará en la "zona de tierra"
- Finalmente, si el canal vertical está sobre el arco *AO*, la descarga irá al cable de tierra "zona protegida" (*Z_p*).



Figura 17. Modelo electrogeométrico para un cable de tierra y una fase



Figura 18. Modelo electrogeométrico con 1 conductor de fase y 1 cable de tierra

Para cada valor de corriente se presenta una zona desprotegida, que corresponde al arco AB o a la distancia horizontal Z_f de la *Figura 16*.

De la Figura 18, se calculan b y L:

$$L = a_{2} - a_{1}$$

b = y_{1} - y_{2} (27)

El ángulo entre los dos radios r_c está definido con 2β y es:

$$\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2r_{c}} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{L^{2} + b^{2}}}{2r_{c}} = \sin^{-1} \frac{b\sqrt{1 + \tan^{2}\alpha}}{2r_{c}}$$
(28)

Los ángulos θ y α son:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_{g} - Y_{2}}{r_{c}} \qquad \alpha = \tan^{-1} \frac{L}{b}$$
(29)

De aquí se obtienen las zonas protegidas y de falla:

$$m = r_{c} \cdot \cos \theta$$

$$n = r_{c} \cdot \cos (\alpha + \beta)$$
(30)

$$Z_{p} = D_{g} = r_{c} \cdot \cos(\alpha - \beta)$$
$$Z_{f} = m - n = r_{c} \cdot [\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)]$$
(31)

Si r_g es menor o igual a y_2 , se hace θ igual a cero.

A partir del cálculo de los valores de X_1 , la distancia del cable de tierra, y X_2 , la distancia de la fase, ver ecuación (27), se tiene:

- Si X_2 es más grande o igual que X_1 , la fase estará expuesta y existirán zona de falla, zona protegida y zona de tierra; es decir, dependiendo de la magnitud y posición de una descarga, esta podrá impactar en la fase, en el cable de tierra o en tierra.
- Si X_1 es más grande que X_2 , sólo existe zona protegida y zona de tierra, y la descarga impactará en el cable de tierra o en la tierra.

4. Comportamiento de las líneas aéreas eléctricas de distribución frente al rayo

4.2.2.1 Un cable de tierra y N fases

De acuerdo a la sección anterior, si X_1 es la distancia del cable de tierra y X_2 , X_k ... X_n las distancias de las fases, se tiene:

- Si X_1 es más grande que cualquier X_n se puede asegurar que sólo existen zona de falla y zona de tierra y la descarga impactara en el cable de tierra o en tierra.
- Si la distancia X_n es más grande o igual que X_1 , la fase *n* estará expuesta y existirá zona de falla, zona protegida y zona de tierra; es decir, dependiendo de la magnitud y posición de una descarga, está podrá impactar en la fase *n*, en el cable de tierra o en la tierra.
- Si existen *j* conductores de fase con distancias *X* más grandes o iguales a X_1 , y se quiere saber en qué fase impactará una descarga se debe repetir este mismo análisis pero sólo con estas fases.

La metodología se puede generalizar para líneas con *m* cables de tierra y *n* fases.

4.3 Nivel de aislamiento de la línea de distribución

Muchas de las construcciones aéreas utilizan más de un material aislante para protección contra las descargas atmosféricas. Los componentes más comunes utilizados en la construcción de líneas aéreas de distribución son porcelana, aire, madera, polímero y fibra de vidrio. Cada elemento tiene su propia capacidad de aislamiento. Cuando los materiales aislantes se utilizan en serie, el nivel de aislamiento resultante no es la suma de los niveles asociados con los componentes individuales, sino que es algo menos que dicho valor.

Los siguientes factores afectan los niveles de contorneamiento ante descargas tipo rayo de líneas de distribución y dificultan estimar el nivel de aislamiento total:

- Condiciones atmosféricas tales como densidad del aire, humedad, precipitación pluvial y contaminación atmosférica.
- Polaridad y velocidad de incremento de tensión.
- Factores físicos tales como forma del aislador, forma del herraje metálico, y configuración del aislador (montado verticalmente, horizontalmente o en ángulo).

Si existe madera en la trayectoria de descarga del rayo, el efecto del rayo sobre la capacidad de aislamiento puede ser muy variable dependiendo principalmente de la humedad en la superficie de la madera. La capacidad de aislamiento depende en un menor grado de las dimensiones físicas de la madera.

Aunque en el diseño se deba estar familiarizado con el nivel básico de aislamiento, *BIL*, de una combinación dada de materiales aislantes, los estudios o cálculos en referencia a descargas atmosféricas están dados en términos del voltaje de contorneamiento, *CFO*, de estas combinaciones. El voltaje de contorneamiento se define como el nivel de

tensión al cual estadísticamente existe el 50% de probabilidad de contorneamiento. Este valor es un punto definible en el laboratorio. Si se asume que los datos de contorneamiento presentan una distribución de Gauss, entonces cualquier probabilidad específica de no contorneamiento puede calcularse a partir de la tensión de contorneamiento y de la desviación estándar.

Una vez que se tuvieron disponibles todos los datos de laboratorio, se estudiaron varios métodos tratando de desarrollar un procedimiento para determinar la tensión de contorneamiento esperado, *CFO*, de una combinación de componentes dados. La aproximación de "capacidad de aislamiento - aditiva" puede ser la más práctica.

Este método fue adoptado de un procedimiento similar utilizado anteriormente en el diseño de líneas de transmisión pero ha sido ampliado en su aplicación a múltiples componentes aislantes usados en la construcción de líneas de distribución. El método utiliza el voltaje de contorneamiento, *CFO*, del elemento aislante básico o primario y agrega a este valor los incrementos en *CFO* ofrecidos por los componentes adicionados, (teniendo siempre presente que la capacidad de aislamiento aditiva es siempre menor que la de un elemento simple adicionado).

4.4 Descargas directas

4.4.1 Comportamiento del conductor de fase

Las descargas directas sobre los conductores de fase producirán, casi con certeza, un contorneamiento directo de las cadenas aisladoras, ocasionando una falla usualmente monofásica.

Podemos observar como el contorneamiento ocurrirá si tenemos en cuenta que la impedancia característica de una línea de distribución, es aproximadamente 400 Ω , y que un rayo promedio tiene una corriente pico de alrededor de 30 kA, con lo cual la sobretensión pico promedio inducida en la línea, es:

$$V = \frac{30 \text{ kA}}{2} \times 400 \ \Omega = 6000 \text{ kV}$$

Si tenemos en cuenta que la tensión crítica de contorneamiento (tensión a la cual el aislamiento produce contorneamiento el 50% de la veces), de una línea de distribución, es normalmente inferior a los 300kV, concluimos que es muy poco probable que una línea de distribución soporte sin contorneamiento una descarga directa sobre los conductores de fase.

Este tipo de descargas tienes tres características importantes desde el punto de vista de los daños que pueden causar:

• Si la magnitud de la tasa de crecimiento de la corriente de la descarga tiene un valor suficientemente alto, puede romper el aislamiento interno de los aisladores en puntos de la línea ubicados en cercanías del punto de impacto de la descarga (alrededor de 50 m). Para que este daño ocurra se debe cumplir que la descarga

4. Comportamiento de las líneas aéreas eléctricas de distribución frente al rayo

alcance la tensión de ruptura de frente escarpado del aislador, en un tiempo inferior a 0,1 μ s. Para aislamientos de sistemas de distribución esto corresponde a tasas de crecimiento de la corriente del rayo superiores a 10 kA/ μ s, las cuales tienen una probabilidad del orden del 70%.

La ruptura del aislamiento interno del aislador no siempre se produce, debido a que el aislamiento del aire normalmente se rompe primero, pero a medida que la tasa de crecimiento de la tensión es mayor, la rigidez del aislamiento del aire mejora ostensiblemente y puede ocurrir que se haga superior a la del aislamiento interno del aislador obligándolo a que se produzca la ruptura eléctrica a través de él.

- Si la magnitud de la corriente de la descarga tiene suficiente valor, producirá flameo al aire y en consecuencia una falla monofásica que obligará la salida del circuito, con el consiguiente deterioro de la calidad del servicio. Dado el bajo nivel de aislamiento en las líneas de distribución, la magnitud de la corriente necesaria para producir esta falla se puede estimar como de solo 1 kA: 200kV/(400/2Ω), valor que superan el 99,9% de los rayos.
- Si la distancia entre pararrayos y transformadores es excesiva, la reflexión de ondas en los bornes de los transformadores incrementa la tensión excesivamente en esos puntos, rompiendo su aislamiento interno. Aunque este efecto se ve amortiguado con la distancia debido a los efectos resistivo e inductivo de la línea, se ha establecido que la distancia entre pararrayos y equipos debe ser tan corta como sea posible y que para un valor superior de 40 m, la protección del pararrayos al equipo es deficiente.

4.4.2 Comportamiento del cable de tierra

Cuando la descarga impacta directamente el cable de tierra o la torre, se presentan varios fenómenos:

• La onda electromagnética producida por la descarga viaja a los largo del conductor de guarda, e induce, debido al acople inductivo y capacitivo con los conductores de fase, una sobretensión en estos últimos que puede causar un contorneamiento fase-tierra.

El factor de acople entre cables de guarda y conductores de fase es el porcentaje de tensión inducida en la fase para una sobretensión dada en el cable de guarda. En líneas de distribución varía entre 0,1 y 0,5, dependiendo de la altura del cable de guarda sobre los conductores de fase. En el mejor de los casos, con ángulos de apantallamiento menores de 30°, el factor de acople es aún suficiente para que una descarga promedio produzca contorneamiento. Lo podemos observar de la siguiente forma:

La tensión inducida en el cable de guarda, el cual tiene una impedancia característica cercana a 500 Ω , para una descarga promedio, es aproximadamente: 7500 kV (30 kA • 500/2 Ω), con lo cual la inducción en el conductor de fase será del orden de 750 kV con un factor de acople de 0,1; haciendo inminente el contorneamiento a tierra en el conductor de fase.

• La descarga impacta en el vano del cable de guarda o en la torre, repartiéndose entre los cables de guarda y la puesta a tierra del poste. Dado que normalmente la puesta a tierra en la líneas de distribución es muy pobre (reduciéndose a enterrar una varilla *copperweld*), la resistencia de puesta a tierra del poste es usualmente alta (mayor de 20 Ω), con lo cual una corriente de rayo relativamente baja producirá un apreciable incremento de tensión entre el conductor de puesta a tierra (o el cable de guarda) y los conductores de fase, facilitando la aparición de un contorneamiento por cebado inverso.

Para que ocurra contorneamiento por cebado inverso en una línea de distribución, se requiere que la tensión producida por la corriente a tierra sea mayor que la tensión crítica de flameo inverso, más tres desviaciones estándar del aislamiento de la línea. Esta tensión, en líneas de distribución, no supera los 300 kV, con lo cual la corriente necesaria para producir flameo es aproximadamente: 15 kA (I = 300 kV / 20 Ω). Para producir esta corriente se requiere alrededor de 30 kA de corriente en la descarga atmosférica, con lo cual se espera que cerca del 50% de las descargas en la línea de distribución produzcan contorneamiento por cebado inverso. Así pues, si la resistencia de puesta a tierra es alta, se producirá contorneamiento directo por inducción o inverso por sobretensión en el cable de guarda, por lo que debe procurarse que este valor sea tan bajo como se pueda.

4.4.3 Sobretensiones por descargas directas

4.4.3.1 Impacto en un conductor de fase

La *Figura 19* muestra un esquema con el impacto de un rayo en un conductor de fase, que generalmente será el conductor situado en una posición más elevada. La corriente del rayo se dividirá en dos partes iguales que darán lugar a dos tensiones que se propagarán en ambos sentidos. La tensión máxima originada en el conductor donde impacta el rayo vendrá dada por:

$$V_{c} = Z_{c} \cdot \frac{I}{2}$$
(32)

Donde:

 Z_c : Es la impedancia característica del conductor (Ω) *I*: Es la intensidad máxima del rayo (A)

La impedancia de onda de un conductor se encuentra en función de su altura media h y de su radio rc y se puede calcular de la siguiente forma:

$$Z_{c} = 60 \cdot \ln\left(\frac{2000 \cdot h}{r_{c}}\right)$$
(33)
Donde:

h: Es la altura del conductor (m) r_c : Es el radio del conductor (mm)

En las otras fases de la línea también se originarán sobretensiones por acoplamiento. Si K es el factor de acoplamiento entre dos fases, la tensión máxima inducida en otra fase será:

$$V_{c2} = K \cdot V_{c1} = K \cdot Z_c \cdot \frac{I}{2}$$
(34)

Siendo:

 V_{c2} : Es la tensión inducida en el segundo conductor de fase (V) V_{c1} :Es la tensión en el primer conductor, en este caso por el impacto directo del rayo (V)

El contorneamiento en la línea puede producirse:

• Entre conductores de fase si la diferencia de tensiones es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores:

$$V_{c1} - V_{c2} = (1 - K) \cdot Z_{c} \cdot \frac{I}{2}$$
 (35)

• En la cadena de aisladores más próxima al impacto si las tensiones que se propagan desde el punto de impacto superan la tensión crítica de contorneamiento.



Figura 19. Impacto directo en un conductor de fase

4.4.3.2 Impacto en un conductor de tierra

La Figura 20 muestra dos posibilidades que se pueden presentar en el impacto directo de un rayo a un conductor de tierra: el rayo impacta en un punto localizado en el vano del conductor (a) o justo en el poste (b).

Si el impacto se produce en el conductor de tierra el análisis es similar al anterior. Las tensiones originadas en este conductor y en el conductor de fase serán:

$$V_{ct} = Z_{ct} \cdot \frac{I}{2}$$
(36)

$$V_{c} = K \cdot V_{ct} \tag{37}$$

Donde:

 V_{ct} : Es la tensión en el cable de tierra originada por el impacto directo (V) Z_{ct} : Es la impedancia de onda característica del conductor de tierra (Ω) V_c : Es la tensión inducida en el conductor de fase (V) K: Es el factor de acoplamiento entre el cable de tierra y el cable de fase

El coeficiente o factor de acoplamiento se puede obtener a partir de la impedancia característica del cable de tierra, Z_{ct} , y a partir de la impedancia mutua entre cable de tierra y conductor, Z_{ct-c} , según la siguiente expresión:

$$K = \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct}}$$
(38)

$$Z_{ct} = 60 \cdot \ln\left(\frac{2000 \cdot h_{ct}}{r_{ct}}\right)$$
(39)

$$Z_{\text{ct-c}} = 60 \cdot \ln \left(\frac{h_{\text{c}} + h_{\text{ct}}}{\left| h_{\text{c}} - h_{\text{ct}} \right|} \right)$$

$$(40)$$

Donde:

 h_c : Es la altura del conductor de fase (m) h_{ct} : Es la altura del cable de tierra (m) r_{ct} : Es el radio del cable de tierra (mm)



Figura 20 a) Impacto en el vano



Figura 20 b) Impacto en un poste

Si la diferencia entre las tensiones obtenidas a partir de (4.17) y (4.18) es suficientemente grande entonces el contorneamiento se producirá entre el cable de tierra y el conductor de fase en el punto de impacto:

$$V_{ct} - V_c = (1 - K) \cdot V_{ct}$$
 (41)

Si no es así, las ondas de tensión que se produjeron en el punto de impacto alcanzarán los postes más próximos donde se originarán ondas que viajaran a tierra que con casi total seguridad originarán contorneamiento por cebado inverso.

4. Comportamiento de las líneas aéreas eléctricas de distribución frente al rayo

Si el impacto se produce directamente en el punto de conexión con el poste, la corriente del rayo se dividirá entre una parte que viajará a tierra a través del poste, y otra que se dividirá a su vez en dos partes iguales que se propagarán en ambos sentidos a través del cable de tierra, *Figura 20 b*).

A continuación se describe el procedimiento recomendado por el *IEEE* para el cálculo de la tensión que aparece en los aisladores como consecuencia de un impacto directo en un cable de tierra o en un poste, y para calcular la corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará contorneamiento.

La *Figura 21* muestra el modelo simplificado utilizado para calcular la tensión, V_t , que aparece en la parte alta del poste, se asume que reflexiones de postes adyacentes reducirán la cola rápidamente, de tal manera que se obtiene la expresión para un tiempo t de subida del rayo de 2 µs. Los voltajes de baja frecuencia pueden ser ignorados. Aunque estos pueden afectar cual o cuales fases presenten contorneamiento, los efectos del voltaje de baja frecuencia no cambiarán la tasa total de contorneamiento.



Figura 21. Modelo simplificado OHGW IEEE

El voltaje inducido en los aisladores, resuelto en $t=2 \mu s$, se obtiene mediante:

$$V_{t} = \frac{t}{2} \cdot \left(Z_{i} - \frac{Z_{w} \cdot (1 - \psi^{N})}{1 - \psi} \right) + \tau \cdot Z_{w} \cdot \left(\frac{\left(1 - \psi^{N}\right)}{\left(1 - \psi\right)^{2}} - \frac{N \cdot \psi^{N}}{1 - \psi} \right)$$

$$(42)$$

$$Z_{w} = \frac{2 \cdot R_{i}^{2} \cdot Z}{\left(Z + R_{i}\right)^{2}} \cdot \frac{\left(Z - R_{n}\right)}{\left(Z + R_{n}\right)}$$

$$(43)$$

$$Z_{i} = \frac{R_{i} \cdot Z}{Z + R_{i}} \tag{44}$$

$$\psi = \frac{\left(Z - R_{i}\right) \cdot \left(Z - R_{n}\right)}{\left(Z + R_{i}\right) \cdot \left(Z + R_{n}\right)}$$

$$(45)$$

$$R_{n} = 0, 5 \cdot \frac{Z_{ct} \cdot R_{0}}{Z_{ct} + R_{0}}$$
(46)

Donde:

 I_R : Es la corriente pico del rayo (kA)

Z: Es la mitad de la impedancia del cable de tierra (Ω)

 R_i : Es la resistencia de puesta a tierra del poste (Ω)

 R_0 : Es la resistencia de puesta a tierra del poste adyacente (Ω)

 R_n : Es la resistencia de puesta a tierra de los 2 postes adyacente (Ω)

 τ : Es el tiempo de propagación de la onda hasta el poste adyacente a la velocidad de la luz c (s)

 Ψ : Es el coeficiente de amortiguamiento adimensional

N: Es el número de onda en el que se alcanza el instante t/2 τ

 Z_i : Es la impedancia intrínseca (Ω)

 Z_w : Es la impedancia de onda (Ω)

Una tierra no lineal dada por las ecuaciones siguientes se utiliza para la puesta a tierra del poste escogido:

$$R_{i} = \frac{R_{0}}{\sqrt{1 + \frac{i_{r}}{I_{g}}}}$$

$$(47)$$

$$I_{g} = \frac{E_{g} \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_{0}^{2}}$$
(48)

$$\dot{I}_{r} = I_{R} \cdot \frac{R_{0} \cdot Z}{R_{0} + Z}$$

$$\tag{49}$$

Donde:

 E_g : Es la tensión de falla del terreno, se asume 300 kV/m ρ : Es la resistividad del terreno (Ω m)

La tensión que aparece en un conductor se calcula mediante la expresión:

$$V_c = V_t \cdot (1 - k) \tag{50}$$

Donde K es el factor de acoplamiento entre cable de tierra y conductor calculado según (38).

La corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará contorneamiento se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_{c} = \frac{V_{max}}{V_{c}}$$
(51)

$$V_{\max} = 1, 5 \cdot CFO$$
(52)

Donde:

 V_{max} : Es la tensión máxima de contorneamiento (V) V_c : Es la tensión inducida en el conductor de fase (Ω) *CFO*: Es la tensión crítica de contorneamiento (V)

La impedancia del poste y el tiempo de recorrido no contribuirán significativamente a incrementar los voltajes cerca del frente de onda, debido a las pequeñas alturas de los postes. Por ello, los efectos del poste pueden ser ignorados.

Los efectos de la resistividad del terreno para simular una tierra no lineal serán tratados mediantes fórmulas de corrección de la altura de los conductores y cables por una nueva altura eficaz modificada según se explicará más adelante.

4.4.4 Consideraciones adicionales para impactos directos

A continuación se hará referencia a consideraciones que atañen al diseño de líneas de distribución o a la implementación del estudio de las mismas.

4.4.4.1 Altura de la estructura

Las descargas atmosféricas pueden tener un efecto muy significativo en la confiabilidad de una línea, especialmente si sus postes son más altos que el medio que la rodea. Muchos rayos son recolectados por las estructuras más altas. La tasa de recolección de rayos N, en terreno abierto (sin árboles o edificios en la cercanía), es estimada de acuerdo a la ecuación:

$$N = N_{g} \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right)$$
(53)

Donde:

h: Es la Altura del poste (m)
b: Es el Ancho de la estructura (m)
N_g: Es la Densidad de descargas (rayos/km2/año)

Para la Mayoría de las líneas de distribución el factor b, ancho de la estructura, es despreciable.

De la ecuación (53), si la altura del poste se aumenta un 20%, la rata de rayos a la línea de distribución se incrementará en un 12%.

La exposición de la línea de distribución a las descargas tipo rayo depende de qué tanto sobresalen las estructuras por encima del terreno cercano. Estructuras localizadas en lo alto de las montañas, cordilleras o cerros serán más vulnerables a las descargas tipo rayo que aquellas protegidas por medios naturales.

4.4.4.2 Protección por árboles y estructuras cercanas

Árboles y edificios pueden jugar un papel importante en el comportamiento de las líneas de distribución frente a las descargas atmosféricas. Los árboles y los edificios pueden interceptar muchas descargas tipo rayo que de otra manera pudieran caer sobre la línea. La influencia de los objetos cercanos en el número de descargas sobre una línea de distribución es expresada usando el factor de protección, Sf, y está definido como la porción por unidad de una línea de distribución protegida por objetos cercanos. El número de impactos sobre la línea es entonces:

$$N_{s} = N(1 - S_{f})$$
(54)

Donde:

 N_s : Es el Número de rayos interceptados por la línea protegida (rayos/100km/año) N: Es la Tasa de recolección de rayos en terreno abierto (rayos/100km/año) ec. (50) S_f : Es el Factor de protección del entorno, valores entre 0 y 1

Un factor de protección de $S_f=0$ significa que la línea de distribución está en terreno abierto sin ningún árbol o estructura cercanos, y por lo tanto sin apantallamiento por parte de los mismos. Un factor de $S_f = 1$ significa que la línea está completamente apantallada contra los impactos directos.

La *Figura 22* muestra los medios para aproximarse a los factores de protección con objetos de varias alturas, para una línea de distribución de 10 metros de altura. Se asume que los objetos están en una línea uniforme y paralela a la línea de distribución. Se podría representar como una hilera de árboles o edificios paralela a la línea de distribución.



Figura 22. Factores de protección por objetos cercanos para una línea de 10 m de altura

La *Figura 22* puede utilizarse también para objetos que están ubicados en ambos lados de la línea de distribución si se suman los factores de protección para los lados derecho e izquierdo (si la suma de los factores de protección es mayor de uno, entonces el factor total de protección es igual a uno). Como un ejemplo, consideremos una línea aérea de distribución de 10 metros de altura con las siguientes filas de edificios en cada lado:

- a) Una fila de edificios de 7.5 m de altura, 30 m a la izquierda de la línea de distribución ($S_f = 0.23$)
- b) Una fila de árboles de 15 m de altura, 40 m a la derecha de la línea de distribución ($S_f = 0.4$)

Si la densidad de descargas a tierra N_g , es de 1 descarga/km2/año, el número de rayos directos sobre la línea aérea de distribución en campo abierto sería de 11.15 descargas/100 km/año, de la ecuación (53). Con las filas de edificios y árboles se podría reducir a:

$$N_{s} = N \left(1 - \left(S_{fizquierdo} + S_{fderecho} \right) \right)$$
(55)

Donde:

 N_s : Número de rayos interceptados por la línea protegida (rayos/100km/año) N: Es la Tasa de recolección de rayos en terreno abierto (rayos/100km/año) $S_{fizquierdo}$ y $S_{fderecho}$: Son los Factores de protección del entorno, según la Figura 22 en cada lado de la línea. Resultando:

$$N_s = 11,15(1-(0,23+0,4)) = 4,12 \text{ descargas/100km/año}$$

A menos que el aislamiento de la línea de distribución esté protegido con cable de guarda o con pararrayos, todas las descargas directas tipo rayo causarán flameo sin considerar el nivel de aislamiento, el espaciamiento entre conductores o las puestas a tierra. Por lo tanto, para estimar el número de contorneamientos debidos a descargas directas tipo rayo, usamos la ecuación (4) para una línea de distribución en campo abierto, o las ecuaciones (4) y (5) para una línea parcialmente protegida. Se asume que todos los contorneamientos causarán fallas en los circuitos de distribución.

4.4.4.3 Efectos de un terreno imperfecto

La impedancia característica de un conductor sobre un terreno con pérdidas, es decir, con finita conductividad, aumentará con el descenso de la conductividad del terreno y de la frecuencia. La impedancia sobre un amplio rango de frecuencias debe ser evaluada, y mediante una transformada inversa de Fourier obtener una respuesta en el dominio del tiempo. No obstante, el efecto de la finita conductividad del terreno sobre la impedancia característica puede ser modelado con una aceptable precisión para los cálculos que involucran a las descargas atmosféricas, modificando la altura real del conductor por una altura eficaz que vendrá dada por la siguiente expresión:

$$h_{eff} = h + \frac{4,7}{\sqrt{\sigma}}$$
(56)

Donde:

 h_{eff} : Es la altura eficaz para substituir por la real (m) h: Es la altura real del conductor sobre el terreno (m) σ : Es la conductividad para un terreno uniforme bajo el conductor (mS/m)

Esta expresión también puede ser adoptada según el *IEEE* para el cálculo de tensiones inducidas según el método de *Rusck* como se verá más adelante pero modificando la expresión de la siguiente forma:

$$h_{eff} = h + 0, 25 \cdot \sqrt{\rho}$$
 (57)

4.5 Descargas Indirectas

Para el cálculo de las tensiones inducidas por rayos, se siguen tres pasos fundamentales, primero se modela la descarga atmosférica, luego se calcula el campo electromagnético irradiado por la descarga y por último por medio de un modelo de acoplamiento se evalúa la tensión inducida debida al acoplamiento entre el campo electromagnético de la descarga y la línea aérea. En este proyecto no se realizará la modelización de la onda de corriente ya que se empleará el método simplificado de *Rusck* que se presentará a continuación.

4.5.1 Métodos de acoplamiento

Los modelos de acoplamiento más utilizados en la actualidad son: el Modelo de *Rusck*, y el Modelo de *Agrawal et al*..

Modelo de Rusck:

Es un modelo simple. En este modelo se considera que la línea aérea es infinitamente larga, de un solo conductor y el canal de la descarga totalmente recto y perpendicular al plano de tierra. A continuación se muestran las ecuaciones de la línea de transmisión para este modelo:

$$\frac{\partial V^{\phi}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{L} \cdot \frac{\partial \mathbf{I}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = 0$$
(58)

$$\frac{\partial I(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + C' \cdot \frac{\partial V^{\phi}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = C' \cdot \frac{\partial \phi^{i}(\mathbf{x}, h, t)}{\partial t}$$
(59)

Donde:

 ϕ_i : Es el potencial escalar asociado al campo electromagnético de la descarga

 $V\phi_{(x,t)}$: Es el voltaje inducido en la línea debido al potencial escalar asociado al campo incidente

L' y C': Son la impedancia y la capacitancia de la línea por unidad de longitud, respectivamente

 $I_{(x,t)}$: Es la corriente a lo largo de la línea.

La forma de onda de voltaje inducido que este modelo proporciona se asemeja bastante a las formas de onda medidas en campos de prueba, y aunque no es ciento por ciento exacta la amplitud máxima del voltaje inducido calculada con este modelo es bastante cercana a la amplitud en algunos campos de prueba. Otra característica positiva de este modelo es que el tiempo de cálculo que requiere no es muy alto ya que las expresiones que proporciona no son iterativas. Una de las desventajas que tiene este modelo es que no considera el aporte que hace el potencial vectorial asociado a la corriente de la descarga al campo eléctrico horizontal. Además este modelo no tiene en cuenta la conductividad finita del terreno (este aspecto puede ser corregido como hemos visto por la expresión (57). En la Figura 23 se muestra el circuito equivalente del Modelo de *Rusck*.



Figura 23. Circuito equivalente del modelo de acoplamiento de Rusck

Modelo de Agrawal, Price y Gurbaxani:

Este modelo hace referencia a una línea aérea de múltiples conductores (sin pérdidas) excitada por un campo electromagnético no uniforme, dicha línea se encuentra ubicada sobre un terreno de conductividad infinita (el aspecto de la conductividad infinita puede ser corregido mediante herramientas como el *LIOV Code*).

Las formas de onda de voltaje y corriente que entrega este modelo son muy similares a las obtenidas experimentalmente en laboratorios de Francia, Italia y Suiza, comparados con los valores pico de voltajes y corrientes obtenidos con el modelo de *Agrawal et al.*.

Las expresiones de la línea aérea que proporciona este modelo son iterativas, esto hace que el tiempo computacional que requiere la solución de este modelo se más prolongado que el de otros modelos cuyas expresiones son analíticas. A continuación se presentan las expresiones del modelo de *Agrawal et al*.:

$$\frac{\partial \left[\mathbf{I}_{i}(\mathbf{x},t)\right]}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{G}_{ij}\right] \cdot \left[\mathbf{V}_{i}^{S}(\mathbf{x})\right] + \left[\mathbf{C}_{ij}\right] \cdot \frac{\partial \left[\mathbf{v}_{i}^{S}(\mathbf{x})\right]}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \left[\mathbf{v}_{i}^{S}(\mathbf{x})\right]}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{R}_{ij}\right] \cdot \left[\mathbf{I}_{i}(\mathbf{x},t)\right] + \left[\mathbf{L}_{ij}\right] \cdot \frac{\partial \left[\mathbf{I}_{i}(\mathbf{x},t)\right]}{\partial t} =$$

$$= \left[\mathbf{E}_{x_{i}}^{i}(\mathbf{x},\mathbf{h}_{i}) - \mathbf{E}_{x_{0}}^{i}(\mathbf{x},0)\right]$$
(61)

Donde:

 $[V_i^S(x)]$ y $[I_i(x)]$: Son vectores en el dominio del tiempo del voltaje y de la corriente distribuidos a lo largo de la línea.

 $[E_{xi}^{i}(x,hi)]$: Es el vector del campo eléctrico (en la dirección del eje x) que excita a los conductores de la línea.

 $[L_{ij}]$: Es la matriz de la impedancia de la línea por unidad de longitud, asumiendo que las distancias entre conductores son mucho mayores que su radio.

 $[G_{ij}]$: Es la matriz conductancia transversal por unidad de longitud

 $[C_{ij}]$: Es la matriz de capacitancia de la línea por unidad de longitud.

 $[R_{ij}]$:Es la matriz de resistencia por unidad de longitud.

Nota: los subíndices i y j hacen referencia al conductor i y al conductor j, respectivamente.

Las condiciones de terminales para este modelo son:

$$V_{i}^{S}(0, t) = -Z_{A} \cdot i(0, t) - V_{i}^{i}(0, t)$$
(62)

$$V_{i}^{S}(L, t) = Z_{B} \cdot i(L, t) - V_{i}^{i}(L, t)$$
 (63)

Debido a la gran aceptación de este modelo, recomendado por el *IEEE* y *CIGRE*, se han desarrollado herramientas computacionales para el cálculo de tensiones inducidas basadas en este modelo. Además de las ventajas relacionadas con la exactitud de los resultados que entrega, este modelo tiene la ventaja de poder evaluar voltajes inducidos en líneas aéreas ramificadas (realizando algunas modificaciones) y utilizando diferentes modelos de canal de descarga atmosférica, incluso para un canal inclinado. La *Figura 24* presenta el circuito equivalente del modelo de *Agrawal et al.*.

El modelo de *Agrawal et al.* es el más aceptado en la literatura mundial debido a los resultados que predice con mayor exactitud y es el modelo más flexible para ser usado en diferentes configuraciones de líneas.

El modelo de *Rusck* predice los mismos resultados que el modelo de *Agrawal et al.*, en los casos en que el canal de la descarga retorno del rayo es perpendicular a la línea y cuando el punto de impacto de la descarga está ubicado sobre la línea de propagación del voltaje inducido, esto es debido a que en este modelo no se tiene en cuenta la contribución del potencial vectorial.

4.5.2 Sobretensiones por descargas indirectas

A continuación se presentará el modelo de *Rusck* simplificado, el cual como ya hemos dicho es de gran aceptación por simplicidad y su aceptable precisión de resultados. Quizá no es el método más preciso pero si el más rápido, siendo una excelente herramienta de calibración para otros métodos que entrañen una mayor complejidad como puedan ser el cálculo estadístico sistemático mediante el *método de Monte Carlo* y otro método de acoplamiento, o el uso de software *EMTP*.

4.5.2.1 Líneas monofásicas

Una de las fórmulas analíticas más sencillas para calcular la magnitud de la sobretensión inducida fue creada por *Rusck*. Este análisis se limita a una configuración simple, un conductor infinito sobre un terreno ideal, excitado por un impulso electromagnético tipo rayo (*LEMP*) y suponiendo una propagación según el modelo línea de transmisión a una velocidad relativa v, en relación a la velocidad de la luz c. El modelo de *Rusck* en la actualidad continúa usándose como referencia de calibración para otros modelos.

De acuerdo a *Rusck*, la máxima tensión que puede ser inducida en una línea de energía en el punto más cercano al rayo puede estimarse por:

$$V = 30 \left(1 + \frac{v/c}{\sqrt{2 - (v - c)^2}} \right) \left(\frac{h \cdot I_p}{d} \right)$$
(64)

Donde:

V: Es el voltaje inducido en la línea cercana al impacto del rayo (kV)
v: La velocidad de la descarga de retorno (m/s), normalmente c/3
c: es la velocidad de la luz, 3·108 m/s *I_p*: es la corriente pico de la descarga (kA) *h*: es la altura del conductor sobre tierra (m) *d*: es la distancia lateral desde la línea horizontal hasta la terminación vertical de la descarga a tierra (m)

Una de las limitaciones del Modelo de *Rusck*, como es la influencia del terreno imperfecto, puede solventarse con una aceptable precisión aumentando la altura aparente de los conductores de fase sobre el terreno, usando la ecuación (53) que hemos visto anteriormente.



Figura 24. Circuito equivalente para el modelo de acoplamiento de Agrawal et al.

4.5.2.2 Líneas monofásicas con cable de tierra

La tensión inducida en un conductor de fase, V_c , debido a descargas que caen a tierra en las cercanías de la línea, se ve reducida por la presencia de un cable puesto a tierra a través de los postes. En este caso, el cable de tierra tiene el mismo efecto tanto si se coloca por encima como por debajo del conductor de fase. Analizando el efecto de un cable de tierra, *Rusck* asume que si un cable es puesto a tierra a través de una resistencia *R*, la intensidad que circula a través de dicha resistencia vendrá dada por la expresión:

$$I = \frac{V_{ct}}{\frac{Z_{ct}}{2} + R}$$
(65)

Dónde:

 V_{ct} : es la tensión inducida en el cable de tierra debida a descargas indirectas (kV) Z_{ct} : es la impedancia característica del cable de tierra (Ω)

La tensión inducida en el conductor de fase por esta intensidad será:

$$\Delta V_{c} = -\frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R} V_{ct}$$
(66)

Dónde:

 Z_{ct-c} : es la impedancia mutua entre el cable de tierra y el conductor de fase (Ω)

La tensión inducida resultante en el conductor de fase será:

$$V_{c}' = V_{c} + \Delta V_{c} = V_{c} - \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R} V_{ct}$$
(67)

Puesto que la tensión inducida es directamente proporcional a la altura, el factor de protección o de apantallamiento vendrá dado por la expresión:

$$pr = 1 - \frac{h_{ct}}{h_c} \cdot \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R}$$
(68)

Dónde:

 h_{ct} : es la altura del cable de tierra en referencia al terreno (m) h_c : es la altura del conductor de fase en referencia al terreno (m) pr: es el factor de apantallamiento del cable de tierra La tensión inducida en el conductor teniendo en cuenta la presencia de un cable de tierra se calculará según la siguiente expresión:

$$V' = pr \cdot V \tag{69}$$

Dónde:

V: es la tensión inducida cuando no hay cable de tierra (kV), ver la expresión (65)

Según la tipología más usual en las líneas de distribución, empleando como fuente de referencia el *IEEE*, el factor de apantallamiento por un cable de tierra, pr, tenderá típicamente a un valor entre 0,6 y 0,9.

La frecuencia de contorneamiento puede aumentarse dramáticamente para los bajos niveles de aislamiento. La Figura 25 presenta la frecuencia de flameo en función de la tensión de contorneamiento de impulso crítico, *CFO*, *de la línea; se muestran los resultados para dos configuraciones: línea con* cable de tierra y línea sin cable de tierra, para una línea de distribución en terreno abierto con una altura de 10 m y una $N_g=1$ descarga/km2/año (aproximadamente 11 descargas directas/100km/año).

En terreno abierto, las tensiones inducidas serán un problema solamente para las líneas con muy bajos niveles de aislamiento. Por ejemplo, el número de flameos por tensiones inducidas tenderá o superará el número de contorneamientos por descargas directas para una línea sin puestas a tierra si la tensión de contorneamiento crítica es inferior a 75 kV (*Figura 25*).

En áreas protegidas, los flameos generados por tensiones inducidas son los de mayor preocupación. Típicamente, una suposición que se utiliza para líneas de distribución es que si el voltaje de flameo por impulso crítico es mayor o igual a 300 kV, los flameos por tensiones inducidas serán eliminados. Casi todas las mediciones de tensiones inducidas han sido inferiores a 300 kV, y la Figura 25 indica que una línea con voltaje de voltaje de contorneamiento crítico mayor de 300 kV tendrá muy pocos contorneamientos generados por tensiones inducidas.

Otro factor a considerar es que la mayoría de las líneas de distribución tienen transformadores de distribución protegidos con pararrayos, los cuales proveen algún grado de reducción de los contorneamientos por tensiones inducidas. Sin embargo, esta reducción puede llegar a ser pequeña en centros rurales o suburbanos.



Figura 25. Número de contorneamientos por tensiones inducidas en comparación al CFO de la línea

5. Nivel de aislamiento. Mejora e influencia

El diseño de una línea eléctrica puede ser más o menos complejo dependiendo de muchos factores, tanto intrínsecos a la línea eléctrica como ajenos a la misma. En los siguientes puntos veremos una panorámica sobre consideraciones y/o elementos recogidos por los estándares del *IEEE* en cuanto al nivel del aislamiento se refiere y las consideraciones para su mejora. El objetivo de estas consideraciones no es el acercamiento riguroso a cada elemento en cuestión, sino ofrecer una visión más amplia del conjunto formado por el fenómeno rayo y las líneas de distribución.

5.1 Tensión crítica de contorneamiento, CFO, aislamiento combinado en serie

Los estudios han indicado que un metro de madera o de fibra de vidrio agregan aproximadamente 330 - 500 kV a la resistencia al impulso del aislamiento total. Para longitudes superiores, la capacidad de aislamiento tipo rayo de la cruceta de madera o de fibra de vidrio y la combinación con el aislador están determinadas principalmente por la sola cruceta de madera o de fibra de vidrio. El aislamiento de tensión alterna se obtiene para el aislador solo y la cruceta de madera o de fibra de vidrio se considera como aislamiento adicional para la tensión de descarga tipo rayo.

Cuando la trayectoria de descarga tipo rayo a tierra no incluye una cruceta de madera o de fibra de vidrio, pero envuelve dos o más tipos de aisladores en serie, el *CFO* de la combinación no se obtiene simplemente sumando los *CFO* individuales de los componentes. Los *CFO* de estos aislamientos combinados son controlados por un número de factores diferentes, cada uno de los cuales requiere un análisis individual. Hoy en día, existen muchas diferentes combinaciones y configuraciones utilizadas por las compañías operadoras.

El método del *CFO–aditivo* extendido puede usarse para estimar el *CFO* de una estructura de distribución:

- Determinando la contribución de cada componente individual del aislamiento al *CFO* total de la combinación.
- Estimando el *CFO* total de la combinación, conociendo el *CFO* de los componentes aislantes.

Esto puede hacerse utilizando tablas y curvas que muestren los datos experimentales disponibles y utilizando estos datos para relacionar el efecto de un material adicionado a otro. Este procedimiento considera válidos los datos característicos del *CFO* del aislamiento base y un grupo adicional de datos dados como el *CFO* adicionado por un componente específico.

En aquellas configuraciones en las cuales aparecen dos componentes, el *CFO* de la combinación es mucho más bajo que la suma de los *CFO* individuales. El aislador se considera como el aislamiento primario o aislamiento básico.

La tensión crítica de contorneamiento, *CFO*, obtenido por configuraciones consistentes de dos componentes se calcula como el *CFO* del componente básico más el *CFO* adicionado por el segundo componente.

El CFO total calculado para dos componentes es:

$$CFO_{T} = CFO_{aislador} + CFO_{adic2^{\circ}comp}$$
(69)

Donde:

CFO aislador=CFO del componente primario *CFO adic2°comp*=CFO adicionado por el segundo componente

El CFO total calculado para tres o más componentes es:

$$CFO_{T} = CFO_{aislador} + CFO_{adic2^{\circ}comp} + CFO_{adic3^{\circ}comp} + CFO_{adicn^{\circ}comp}$$
(70)

Donde:

CFO _{*adic3°comp*}=CFO adicionado por el tercer componente *CFO* _{*adicn°comp*}=CFO por el enésimo componente

Los valores aproximados (para valores exactos habría que referirse a los datos del fabricante) de *CFO* individual y el adicionado de los componentes más utilizados en líneas de distribución están dados en las *Tablas 4* a *6*.

Los valores dados en las tablas se refieren a condiciones húmedas las cuales son recomendadas para estimar el valor de *CFO*. Para valores de *CFO* bajo condiciones secas suministradas por el fabricante o tomadas de pruebas de impulso de un laboratorio, multiplique el *CFO* por 0.8 para obtener un valor estimado del *CFO* en condiciones húmedas. El *CFO* en condición húmeda está típicamente entre 0.7 y 0.9 del *CFO* en condiciones secas.

Para componentes no dados en la *Tabla 5* o *4*, el *CFO* total puede ser estimado por reducciones para el segundo y tercer componente como:

 $CFO_{adic2^{\circ}comp} = 0,45 \times CFO_{aislador}$ $CFO_{adic3^{\circ}comp} = 0,20 \times CFO_{aislador}$

El uso de este método del *CFO-aditivo extendido* y las tablas dadas darán generalmente un \pm 20% de error. Estimaciones más seguras se logran con los siguientes métodos:

- Efectuar pruebas de impulso en el laboratorio de la estructura en estudio, bajo condiciones húmedas. Este método dará los resultados más seguros.
- Efectuar pruebas de impulso bajo condiciones secas y multiplicar los valores obtenidos por 0.8 para estimar el *CFO* en condiciones húmedas.

5. Nivel de aislamiento. Mejora e influencia

Aisladores		kV
Tipo Espiga	ANSI 55-4	105
	ANSI 55-5	120
	ANSI 55-6	140
Porcelana	1 . 10.2 cm (4")	75
tipo suspensión	2. 10.2 cm (4")	165
	3. 10.2 cm (4")	250
Aislamiento		kV/m
Aire		600
Poste de madera		330
Cruceta de madera		360
Poste integral de fibra de vidrio		500

Tabla 4. CFO aislamiento primario (aislador).

Tabla 5. CFO adicionado a segundos componentes (CFO ad 2º comp).

Segundo componente	Con primer componente de	kV/m
Cruceta de madera	Aislador tipo pin vertical	250
Cruceta de madera	Aislador de suspensión vertical	160
Cruceta de madera	Aislador de suspensión	295
Poste de madera	Aislador tipo pin vertical	235
Poste de madera	Aislador tipo suspensión	90
Cruceta de fibra de vidrio	Aislador	250
Poste integral de fibra de vidrio	Aislador	315

Tabla 6. CFO adicionado a terceros componentes (CFO ad 3º comp).

	kV/m
Poste de madera	65
Poste integral de fibra de vidrio	200

5.2 Consideraciones prácticas

El equipo y el conjunto de accesorios metálicos de las estructuras de distribución pueden reducir drásticamente el *CFO*. Este punto débil de las estructuras puede

aumentar en gran parte los contorneamientos por tensiones inducidas. Varias situaciones se describen a continuación:

Cables tensores:

Los cables tensores pueden ser un factor importante en la reducción del *CFO* de la estructura. Por ventaja mecánica, los cables tensores están conectados en la parte alta del poste, en general en la vecindad de los elementos aislantes principales. Puesto que los cables tensores proveen una trayectoria a tierra, su presencia generalmente reduce el *CFO* de la configuración. Los pequeños aisladores de porcelana tipo tensor que se utilizan proveen muy poco de aislamiento extra, (generalmente menos de 30 kV de *CFO*).

Puede utilizarse entonces un aislador tensor de fibra de vidrio para ganar una considerable capacidad de aislamiento. Un aislador tensor de fibra de vidrio tiene un CFO de 250 kV aproximadamente.

Fusibles cortacircuitos:

El montaje de los fusibles cortacircuitos es un ejemplo primario de un equipo desprotegido que puede disminuir el *CFO* del poste. Para sistemas de la clase 15 kV, un fusible cortacircuitos puede tener un nivel básico de aislamiento, *BIL*, de 95 kV. Dependiendo de cómo esté montado el cortacircuitos, puede reducir el *CFO* de toda la estructura hasta aproximadamente 95 kV, (aproximadamente porque el nivel básico de aislamiento, *BIL*, de cualquier sistema aislante es siempre menor que el *CFO* de dicho sistema).

En postes de madera, el problema de los fusibles cortacircuitos puede ser mejorado colocando los cortacircuitos de tal manera que el brazo de montaje en el poste esté bien alejado de cualquier conductor conectado a tierra, (cables tensores, cables de tierra y cables de neutro). Esto también es válido para interruptores y otras piezas de equipo no protegidas por los pararrayos.

<u>Altura del cable de neutro:</u>

En cualquier línea dada, la altura del cable de neutro puede variar dependiendo del equipo conectado. En postes de madera, mientras más cerca está el cable de neutro de los cables de fase, menor el *CFO*.

Soportes y estructuras conductoras:

El uso de estructuras de hormigón y de acero en líneas aéreas de distribución está en aumento, lo cual reduce enormemente el *CFO*, además, crucetas metálicas y conjuntos de accesorios metálicos se están utilizando en postes de madera. Si tales elementos metálicos están conectados a tierra, el efecto puede ser el mismo que el de tener una estructura metálica. En tales estructuras, el *CFO* total es suministrado por el aislador y por lo tanto, aisladores con mayor *CFO* deberán ser utilizados para compensar las pérdidas del aislamiento de la madera. Obviamente, se efectúan cambios dependiendo del comportamiento esperado a las descargas tipo rayo y otras consideraciones tales como diseño mecánico y económico.

Pero es muy importante saber que dichos cambios existen. El diseñador deberá estar enterado de los efectos negativos que los elementos metálicos puedan tener en el

comportamiento a las descargas tipo rayo y tratar de minimizar dichos efectos. En configuraciones con postes de madera y crucetas, pueden utilizarse brazos de madera o de fibra de vidrio para mantener buenos niveles de aislamiento.

Circuitos múltiples:

Los circuitos múltiples en un poste causan generalmente un aislamiento reducido ya que se tienen distancias más estrechas entre fases y menos madera en serie. Esto es especialmente cierto en circuitos de distribución en postes de madera construidos por debajo de circuitos de transmisión. Los circuitos de transmisión tienen frecuentemente un cable de protección con una línea de tierra en cada poste. La línea de tierra puede causar reducción en el aislamiento. Pero este puede mejorarse alejando la línea de tierra del poste con espaciadores de fibra de vidrio.

Circuitos con espaciadores de cable:

Circuitos con espaciadores de cable son circuitos aéreos de distribución con espaciamientos muy reducidos. Cable cubierto y espaciadores, (15 a 40 cm), colgados de un cable mensajero proveen soporte y capacidad de aislamiento. Una configuración de espaciador de cable tendrá un *CFO* fijo, generalmente en el rango de 150 – 200 kV. Debido a su relativamente bajo nivel de aislamiento, su comportamiento ante las descargas tipo rayo puede ser más bajo que el más tradicional diseño abierto. Es muy poco lo que se puede hacer para incrementar el *CFO* de un diseño con espaciador de cable.

Un diseño con espaciador de cable tiene la ventaja de un cable mensajero que actúa como un cable de protección. Este puede reducir algunos contorneamientos por descargas directas. Contorneamientos inversos ocurrirán debido al bajo nivel de aislamiento. Si se mejoran las puestas a tierra se mejora el comportamiento contra las descargas tipo rayo.

Distancias explosivas (spark gaps) y unión de aislamientos:

La unión de aisladores se efectúa algunas veces para prevenir el daño causado por la descarga tipo rayo en los postes o crucetas de madera, o también se hace para prevenir la quema de la parte superior del poste de madera. Las distancias explosivas son utilizadas para prevenir el daño causado por las descargas tipo rayo en los materiales de madera. En algunas partes del mundo, las distancias explosivas (spark gaps) son utilizadas en lugar de los pararrayos para protección del equipo.

Las distancias explosivas y unión de aisladores reducirán enormemente el *CFO* de la estructura. De ser posible, distancias explosivas, unión de aisladores, y ensambles para protección de postes no deberían ser utilizados para prevenir daño de la madera. Las uniones locales de aislador – madera en la base del aislador son una mejor solución para evitar daños en la madera y quema de postes.

5.3 Protección con cable de tierra de líneas de distribución

Los cables de tierra son conductores conectados a tierra y colocados sobre los conductores de fase para interceptar las descargas tipo rayo las cuales podrían caer

5. Nivel de aislamiento. Mejora e influencia

directamente sobre las fases. La corriente de la descarga tipo rayo es desviada a tierra a través de una línea de tierra en el poste. Para que sea efectivo, el cable de tierra deberá tener su puesta a tierra en cada poste.

La corriente de la onda de descarga tipo rayo que fluye a través de la impedancia a tierra del poste causa un aumento de potencial que da como resultado una gran diferencia de potencial entre la línea de tierra y los conductores de fase. La diferencia de potencial puede generar un contorneamiento inverso a través del aislamiento de la línea de tierra a uno de los conductores de fase.

El fenómeno del contorneamiento inverso es una exigencia sustancial para la efectividad del cable de tierra en aplicaciones de la línea de distribución. Los cables de tierra proveerán una protección efectiva solamente si:

- Se utilizan buenas prácticas de diseño del aislamiento para proveer suficiente *CFO* entre la línea de tierra y los conductores de fase.
- Se obtienen bajas resistencias a tierra en el poste.

La *Figura 25* puede ser usada para estimar el número de contorneamientos inducidos para un diseño de cable de tierra. Para circuitos de distribución de tres fases, agregar el cable de tierra reducirá el número de contorneamientos inducidos. Puesto que el cable de tierra está sólidamente puesto a tierra, eliminará las tensiones en los conductores de fase a través del acople capacitivo. Mientras más cercanos estén los conductores de fase del cable de tierra, mejor el acople y mucho más bajas serán las tensiones inducidas. Se Observa que adicionar un cable de tierra por debajo de los conductores de fase tendrá aproximadamente el mismo efecto que un cable de tierra por encima.

En un sistema de cuatro cables, con múltiples puestas a tierra, reemplazar el cable del neutro con un cable de tierra por encima, no reducirá el número de contorneamientos inducidos. Sin embargo, teniendo ambos, un cable de tierra y un cable de neutro mejorará en algún grado su comportamiento.

El costo de incluir el cable de tierra en el diseño de una línea de distribución puede ser sustancial. Adicional al costo del conductor, las varillas de tierra, y aislamiento adicional, las alturas del poste deben ser mayores para soportar el cable de tierra de tal manera que exista el adecuado ángulo de apantallamiento entre el cable de tierra y los conductores de fase más externos. La mayor altura de la estructura atraerá más descargas directas, y esto compensará ligeramente algunas de las reducciones en las ratas de contorneamiento generadas por el apantallamiento. A pesar del costo y las dificultades del diseño, los cables de tierra han sido utilizados por varias empresas de energía con gran éxito.

5.4 Ángulo de apantallamiento

Para asegurar que todas las descargas tipo rayo terminen en el cable de tierra en lugar de que ocurra en los conductores de fase, un ángulo de apantallamiento de 45° o menos, (como lo muestra la *Figura 26*), es recomendado. Esto es válido solamente para líneas que tengan menos de 15 m de altura con espaciamiento entre conductores por debajo de 2 m. Líneas más altas requieren ángulos de apantallamiento inferiores.

5. Nivel de aislamiento. Mejora e influencia



Figura 26. Ángulo de apantallamiento del cable de tierra

5.5 Requerimientos de aislamiento

La efectividad del cable de tierra en las líneas de distribución depende en gran parte del aislamiento disponible entre la línea de tierra y los conductores de fase. Si la línea de tierra está en contacto con el poste en toda su altura, es difícil proveer un adecuado aislamiento. En un poste de madera, generalmente es necesario aislar la línea de tierra del poste en la vecindad de los aisladores de fase y las crucetas. Esto puede lograrse utilizando varillas de fibra de vidrio, o parales montados horizontalmente en el poste para sostener el cable de tierra 30 - 60 cm alejado del poste. El *CFO* de la línea de tierra a la fase más cercana es el valor más limitante de varias trayectorias. Se debe tener precaución de aislar los cables tensores para obtener el necesario *CFO*.

Un *CFO* en exceso de 250 - 300 kV es necesario para tener una aplicación efectiva de cable de tierra. Utilizando separadores para la línea de tierra, no es difícil lograr el nivel de aislamiento en las líneas de distribución.

5.6 Efecto de las puestas a tierra y el nivel de aislamiento

La efectividad del cable de tierra es altamente dependiente de las puestas a tierra. Para que el diseño de un cable de tierra sea efectivo, las resistencias a tierra deben ser menores a 10 Ohmios si el *CFO* es menor de 200 kV. Si se presta atención al nivel de aislamiento y el *CFO* es de 300 - 350 kV, una resistencia de puesta a tierra de 40 Ohmios generará un comportamiento similar.

El cable de tierra deberá tener su conexión a tierra en cada poste para resultados efectivos. La *Figura 27* muestra el comportamiento ante descargas directas y el efecto

de puestas a tierra con un ejemplo de una simulación de un cable de tierra con *CFO* de 175 kV y de 350 kV.

Las líneas de distribución construidas debajo de estructuras de transmisión pueden ser muy susceptibles especialmente a contorneamientos inversos. Estructuras de mayor altura y amplitud atraerán más descargas directas. Se debe tener cuidado de mantener altos niveles de aislamiento para evitar unas tasas de contorneamiento innecesariamente altas.



Figura 27. Efecto de la resistencia de puesta a tierra sobre el comportamiento del diseño de cable de tierra (descargas directas)

6. Cálculo de sobretensiones

6.1 Estudio sistemático paramétrico

6.1.1 Introducción

En esta sección se realizará un estudio paramétrico en el que se analiza la influencia que pueden tener algunos parámetros del rayo en las sobretensiones que se originan en una línea aérea de distribución.

Las expresiones utilizadas en el análisis paramétrico para líneas con y sin apantallamiento son:

Líneas sin cable de tierra

Tipo de descargas:

- Descargas directas al conductor de fase:
 - Expresión utilizada (32).
- Descargas indirectas:
 - Método de cálculo: Fórmula de Rusck.
 - Expresión utilizada (64).

Líneas con cable de tierra

Tipo de descargas:

- Descargas directas al conductor de fase:
 - Expresión utilizada (32).
- Descargas al cable de tierra:
 - o Expresión utilizada (50).
- Descargas indirectas:
 - Método de cálculo: Fórmula de Rusck.
 - o Expresión utilizada (68).

Los cálculos han sido realizados mediante MatLab.

6.1.2 Análisis en líneas sin cable de tierra

En este apartado se estudiarán los efectos de los parámetros más importantes que intervienen en el cálculo de sobretensiones originadas por rayos, tanto para sobretensiones originadas por impactos directos en la línea como para sobretensiones originadas por impactos a tierra en la cercanía, para una línea sin cable de tierra.

Configuración de la línea:

La *Figura 28* muestra la configuración de los conductores de la línea empleada en este estudio.



Figura 28. Configuración de la línea sin cable de tierra.

Para la realización del estudio paramétrico se han supuesto otros datos de interés como pueden ser:

- Radio de los conductores de fase. Se han supuesto unos conductores de fase con un radio igual a 10 mm.
- Longitud media de un vano. Se ha supuesto una longitud media de vano igual a 30 m.

Para la mejor comprensión es aconsejable graficar el modelo electrogeométrico como muestra la *Figura 29* ya que así se puede visualizar para que distancia dependiendo de la intensidad, el rayo logrará alcanzar al conductor en un impacto directo.



Figura 29. Modelo electrogeométrico para línea sin apantallar.

6.1.2.1 Influencia de la distancia perpendicular entre línea y descarga.

En el siguiente análisis se ha variado la distancia entre el punto de impacto y la línea en un intervalo entre 0 y 500 m.

Es importante tener en cuenta que a distancias mayores de 200 m la descarga siempre caerá a tierra sea cual sea el valor de su intensidad, esto se puede apreciar fácilmente en la *Figura 29*. Por lo que se supone que una descarga a tierra a una distancia mayor de 500 m no producirá una sobretensión capaz de provocar contorneamiento en la línea.

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 10 kA.
- Velocidad: Se ha mantenido una velocidad para descarga del rayo en función de la intensidad según la expresión (16).
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. La altura de conductores ha sido corregida según (56).

La *Figura 30* muestra como varía la tensión que aparece en la línea en función del punto del impacto de la descarga. El valor de la tensión por descargas directas es constante mientras no se supere la distancia mínima, y_{min} o D'_g , que en este caso es aproximadamente 35 m. A partir de este punto la tensión que aparece en la línea es debida a descargas que caen a tierra. Se puede observar como el valor de la tensión inducida para una distancia igual o superior a 500 m es prácticamente nula.

Es importante ver la diferencia existente en el valor de la tensión cuando se calcula a partir de la expresión (32) para descargas directas, y a partir de la expresión (64) para

descargas indirectas. La *Figura 31* muestra la influencia de la distancia de impacto únicamente para descargas indirectas.



Figura 30. Influencia de la distancia (descargas directas, descargas indirectas).



Figura 31. Influencia de la distancia (descargas indirectas).

6.1.2.2 Influencia de la intensidad de la descarga

En el siguiente análisis se ha variado la intensidad máxima de la descarga entre 1 y 200 kA, puesto que la probabilidad de tener rayos con intensidades superiores a 200 kA es

6. Cálculo de sobretensiones.

prácticamente nula. A su vez la velocidad de la descarga variará en función de la intensidad según la expresión (16).

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Distancia: Se ha mantenido una distancia perpendicular entre la descarga y la línea igual a 102,5 m.
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. La altura de conductores ha sido corregida según (45).



Figura 32. Influencia de I (descargas directas, descargas indirectas).

La *Figura 32* muestra como varía la tensión que aparece en la línea en función de la intensidad del rayo. Es importante visualizar también el gráfico que aparece en la *Figura 29* para entender mejor la influencia de este parámetro. La *Figura 32* se encuentra dividida claramente en dos zonas con un cambio brusco del valor de la tensión al pasar de una a otra. En la primera zona (desde 1 kA hasta unos 90 kA) la tensión que aparece en la línea es debida a descargas que caen a tierra, mientras que en la segunda zona la tensión aparece en la línea es por impacto directo del rayo en alguno de sus conductores. Al igual que se comentó en el estudio anterior, en la primera zona la tensión se calcula utilizando la expresión (*64*) y en la segunda zona a partir de la expresión (*32*). En la *Figura 33* se puede ver más claramente la evolución de la tensión originada por descargas a tierra.



Figura 33. Influencia de I (descargas indirectas).

6.1.2.3 Influencia de la resistividad del terreno

En el siguiente análisis se ha variado la resistividad del terreno entre un rango de valores comprendido entre los 0 y 1000 Ω m mediante las expresiones (56) y (57).

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 10 kA.
- Distancia: Se han utilizado dos distancias perpendiculares entre la descarga y la línea, la primera de ellas igual a 20 m, y la segunda a 100 m. La primera distancia de 20 m indica que el impacto tendrá lugar en el conductor de fase, y la segunda distancia de 100 m indica que el impacto tendrá lugar a tierra.
- Velocidad: Se ha mantenido una velocidad para descarga del rayo en función de la intensidad mediante la expresión (16).

En la *Figura 34* se puede observar el efecto de la resistividad del terreno sobre la tensión inducida por impacto directo de la descarga sobre el conductor de fase. Tal y como encontramos en la literatura del *IEEE* el aumento de la resistividad del terreno comporta un aumento de la tensión inducida.

En la *Figura 35* se puede observar el mismo efecto pero en este caso refiriéndose a las tensiones inducidas por descargas que impactan a tierra en las cercanías.

Podemos observar como a partir de los 200 Ω m el incremento pasa a ser lineal, teniendo una mayor pendiente entre los 1 y 100 Ω m.



Figura 34. Influencia de la resistividad del terreno (descargas directas). L=20m



Figura 35. Influencia de la resistividad del terreno (descargas indirectas). L=100m

6.1.2.4 Influencia de la velocidad de retorno del rayo

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

• Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 30 kA.

- Distancia: Se ha mantenido una distancia perpendicular entre la descarga y la línea igual a 100 m, lo cual indica que el impacto tendrá lugar a tierra en las cercanías.
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. La altura de conductores ha sido corregida según (45).

Se ha variado la velocidad de retorno del rayo entre 30000 y 150000 km/s.



Figura 36. Influencia de la velocidad de la descarga (descargas indirectas).

En la *Figura 36* se aprecia la relación lineal entre la tensión inducida y la velocidad de la descarga de retorno.

Por otra parte, de la expresión (64) se deduce que la tensión inducida también es directamente proporcional a la intensidad máxima de la descarga por lo que mientras solo se originen tensiones inducidas la pendiente de la recta será también proporcional a la intensidad máxima de la descarga.

6.1.3 Análisis de líneas con cable de tierra

En este apartado se estudiarán los efectos de los parámetros más importantes que intervienen en el cálculo de sobretensiones originadas por rayos, tanto por impactos directos a la línea (conductor de fase y cable de tierra) como por impactos a tierra en las cercanías, para una línea con cable de tierra.

6. Cálculo de sobretensiones.

Configuración de la línea:

La *Figura 37* muestra la configuración de los conductores de la línea empleada en este estudio.



Figura 37. Configuración de la línea sin cable de tierra.

Para la realización del estudio paramétrico se han supuesto otros datos de interés como pueden ser:

- Radio de los conductores de fase: Se han supuesto unos conductores de fase con un radio igual a 10 mm.
- Longitud media de un vano: Se ha supuesto una longitud media de vano igual a 30 m.
- Radio del cable de tierra: Se ha supuesto un cable de tierra con radio igual a 5 mm.
- Resistencia de puesta a tierra: La resistencia de la puesta a tierra del cable de tierra se ha asumido a un valor constante de 50 Ω .

Para la mejor comprensión es aconsejable graficar el modelo electrogeométrico como muestra la *Figura 38*, podemos ver por ejemplo como el conductor de fase estará totalmente apantallado por el cable de tierra para intensidades de descarga superiores a los 18 kA.



Figura 38. Modelo electrogeométrico para línea apantallada

6.1.3.1 Influencia de la distancia perpendicular entre línea y descarga

En este caso se ha variado la distancia perpendicular entre el punto de impacto y la línea en un intervalo entre 0 y 500 m.

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 10 kA.
- Velocidad: Se ha mantenido una velocidad para descarga del rayo en función de la intensidad mediante la expresión (16).
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. La altura de conductores ha sido corregida mediante las expresiones (56) y (57).

El gráfico de la *Figura 39* se encuentra divido en tres zonas. La primera zona corresponde a cebados inversos por impactos en el cable de tierra, en esta zona la tensión que aparece es constante ya que su valor no depende de este parámetro. En la segunda zona la tensión que aparece es debida al impacto del rayo en un conductor de fase, esta zona mediante el modelo electrogeométrico podemos situarla entre los 33 y 37 m aproximadamente. Y la tercera zona donde la tensión que aparece es la originada por descargas que impactan a tierra.

La *Figura 40* muestra la influencia de la distancia en la línea con cable de tierra únicamente para descargas indirectas.



Figura 39. Influencia de la distancia de impacto (cebados inversos, descargas directas, descargas indirectas).



Figura 40. Influencia de la distancia de impacto (descargas indirectas).

6.1.3.2 Influencia de la intensidad de la descarga

En el siguiente análisis se ha variado la intensidad máxima de la descarga entre 1 y 200 kA, puesto que la probabilidad de tener rayos con intensidades superiores a 200 kA es prácticamente nula.

La velocidad ha sido variada en función de la intensidad de la descarga según la expresión (16).

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Distancia: Se ha mantenido una distancia perpendicular entre la descarga y la línea igual a 132.5 m, lo cual indica que una descarga igual o mayor de 90 kA impactará directamente sobre la línea
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. La altura de conductores ha sido corregida mediante las expresiones (56 y 57).

La Figura 41 muestra como varía la tensión inducida en la línea en función de la intensidad.

A partir de la *Figura 38* se puede entender mejor la influencia de este parámetro, podemos observar como hasta una intensidad igual a 18 kA la línea no se encuentra apantallada efectivamente por el cable de tierra, es decir, existirá una cierta probabilidad de que las descargas caigan sobre los conductores de fase. A partir de los 18 kA los impactos de rayos solamente irán a parar al cable de tierra o a tierra.



Figura 41. Influencia de la Intensidad de la descarga (descargas directas, descargas indirectas).

En este ejemplo asumimos que la línea esta apantallada efectivamente por el cable de tierra, por tanto, solo existen dos zonas, la correspondiente a descargas a tierra y corresponden a un rango de intensidades entre 1 hasta los 90 kA, y la segunda zona correspondiente a impactos del rayo sobre el cable de tierra y que tendrán unas intensidades superiores a los 90 kA.

La *Figura 42* muestra la influencia de la intensidad en las sobretensiones originadas por rayos en una línea de distribución únicamente para descargas indirectas, es decir, que caen a tierra en las cercanías.


Figura 42. Influencia de la Intensidad de la descarga (descargas indirectas).

6.1.3.3 Influencia de la resistividad del terreno

En el siguiente análisis se ha variado la resistividad del terreno entre un rango de valores comprendido entre los 1 y 1000 Ω m.

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 10 kA.
- Distancia: Se han utilizado dos distancias perpendiculares entre la descarga y la línea, la primera de ellas igual a 20 m, y la segunda a 100 m. La primera distancia de 20 m indica que el impacto tendrá lugar en el cable de tierra, y la segunda distancia de 100 m indica que el impacto tendrá lugar a tierra.
- Velocidad: Se ha mantenido una velocidad en función de la intensidad de la descarga del rayo mediante la expresión (16).

En la *Figura 43* podemos observar como el efecto de la resistividad del terreno pasa a ser totalmente lineal sin incremento alguno para una resistividad superior a los 200 Ω m, esta es la zona de cebados inversos. A mayor resistividad del terreno mayor tensión inducida en la línea.

La *Figura 44* muestra el efecto de la resistividad del terreno para descargas directas al conductor de fase.

En la *Figura 45* por el contrario, en las descargas indirectas, observamos como el comportamiento de la tensión inducida es el de un rápido incremento hasta una resistividad de 100 Ω m para luego a partir de los 200 Ω m continuar también en incremento pero de una forma lineal.



Figura 43. Influencia de la resistividad del terreno (cebados inversos). L=20m



Figura 44. Influencia de la resistividad del terreno (descargas directas conductor fase). L=100m

6.1.3.4 Influencia de la resistencia de puesta a tierra

Este análisis se ha dividido en dos partes:

- Influencia de la resistencia de puesta a tierra de los postes en el cálculo de la tensión debida a cebados inversos.
- Influencia de la resistencia de puesta a tierra de los postes en el cálculo de la tensión originada por descargas a tierra.



Figura 45. Influencia de la resistividad del terreno (descargas indirectas). L=100m

La resistencia de puesta a tierra del cable de tierra se variará entre 1 y 100 Ω . Se realizarán a su vez dos planteamientos, el primero será la influencia del valor de puesta a tierra de los postes en el cálculo de la tensión debida a cebados inversos, y el segundo será la influencia del valor de puesta a tierra de los postes en el cálculo de la tensión debida a descargas indirectas que impactan a tierra en las cercanías.

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 10 kA.
- Velocidad: Se ha mantenido una velocidad para la descarga del rayo en función de la intensidad según la expresión (16).
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. Las alturas de conductores han sido corregidas según las expresiones (56 y 57).
- Distancia: Se han utilizado dos distancias perpendiculares entre la descarga y la línea, la primera de ellas igual a 20 m, y la segunda a 100 m. La primera distancia de 20 m indica que el impacto tendrá lugar en el cable de tierra, y la segunda distancia de 100 m indica que el impacto tendrá lugar a tierra.

La *Figura 46* (cebados inversos) muestra como varía la tensión que aparece en la línea considerablemente en función de la resistencia de puesta a tierra del poste donde impacta el rayo.

La *Figuras 47* (descargas indirectas) mostrará la influencia de la resistencia de puesta a tierra de los postes de la misma forma que la figura anterior pero esta vez únicamente para las descargas que caen a tierra en la cercanía de la línea.



Figura 46. Influencia de la resistencia de puesta a tierra del cable de tierra (cebados inversos)



Figura 47. Influencia de la resistencia de puesta a tierra del cable de tierra (descargas indirectas)

Podemos ver que la resistencia de puesta a tierra no juega un papel tan importante en los impactos indirectos como en los impactos directos. Debido a que la corriente que circula por los postes adyacentes es enormemente inferior a la que circula en el poste donde impacta el rayo, para descargas indirectas la tensión evoluciona linealmente con la resistencia, aunque su variación es pequeña.

6.1.3.5 Influencia de la velocidad de retorno del rayo

En este análisis se han mantenido constantes los siguientes valores:

- Intensidad: Se ha mantenido una intensidad máxima constante para el rayo igual a 30 kA.
- Distancia: Se ha mantenido una distancia perpendicular entre la descarga y la línea igual a 100 m.
- ρ : Se ha supuesto una resistividad del terreno uniforme igual a 200 Ω m. Las alturas de conductores han sido corregidas según las expresiones (56 y 57).

Se ha variado la velocidad de retorno del rayo entre 30000 y 150000 km/s. Como se ha visto en el apartado de línea sin cable de tierra, la influencia de la velocidad solo se tendrá en cuenta para descargas indirectas.

La *Figura 47* muestra como varía la tensión inducida en el conductor de fase en función de la velocidad de la descarga de retorno del rayo.



Figura 48. Influencia de la velocidad de la descarga del rayo (descargas indirectas).

Al igual como se pudo observar en la línea sin cable de tierra, el valor de la tensión evoluciona linealmente con la velocidad, aunque esta variación es pequeña. Cuanto mayor es la velocidad de la descarga de retorno mayor es la tensión que se induce en la línea.

6.2 Cálculo de la tasa de contorneamientos en líneas aéreas de distribución

6.2.1 Introducción

El cálculo de la tasa de contorneamientos (la forma de expresar la *fiabilidad* de la línea) debidos a sobretensiones de origen atmosférico se resumir en dos pasos:

- Distinguir los rayos que impactan en la línea de los que impactan a tierra en las cercanías de la línea.
- Calcular las sobretensiones originadas por los rayos.

Hay diversos métodos para llevar a cabo el estudio de la tasa de contorneamientos. No obstante por su facilidad y previa presentación en el presente proyecto, se detallaran los pasos a seguir para obtener la tasa de contorneamientos mediante la conjunción del Modelo de Rusck y el Modelo electrogeométrico.

Descripción del procedimiento:

Véase que el siguiente procedimiento está referido para una línea sin apantallar, más adelante se detallará la modificación del procedimiento para líneas apantalladas por un cable de tierra.

Definiremos un intervalo (comprendido entre 1 y 200 kA si se pretende conocer la tasa de contorneamiento para todos los rayos *posibles*) para la intensidad pico del rayo (con el incremento deseado, de 1 kA).

- 1. Para cada valor de la intensidad del intervalo fijado, se obtiene la distancia mínima $(Y_{min(I)} \circ D'_{g(I)})$ para la cual el rayo impacta en la línea mediante la ecuación (21), ver *Figura 49* para más detalle.
- 2. Nuevamente para cada valor de la intensidad obtendremos esta vez la distancia máxima $(Y_{max(I)} \circ D_{max(I)})$ para la cual el rayo puede producir un contorneamiento en la línea de distribución. La distancia máxima se obtendrá resolviendo la ecuación (64) para una tensión inducida igual a 1,5·CFO. Obviamente para que las descargas vayan a tierra $Y_{min(I)}$ debe ser menor que $Y_{max(I)}$.
- 3. Se calcula la probabilidad $P_i(I)$, esta será la diferencia entre la probabilidad de la intensidad de ser igual o superar el límite inferior y la probabilidad de la intensidad de ser igual o superar el límite superior inmediato. Según recomendaciones del *IEEE* se utiliza la expresión (14).

Finalmente podemos obtener la tasa de contorneamientos por 100 km y año en la línea de distribución Nc, mediante la suma de los contorneamientos por 100 km y año en la línea de distribución por descargas directas (N_{Cd}) e indirectas (N_{Ci}).

Para la obtención de la tasa de contorneamientos por descargas directas por 100 km y año en la línea de distribución, N_{Cd} , y la tasa de contorneamientos por descargas indirectas por 100 km y año en la línea de distribución, N_{Ci} , la expresión será la siguiente:

$$N_{Ci} = 2 \cdot N_{g} \cdot 0, 1 \cdot \sum_{I=1}^{200} P_{i}(I) \cdot (Y_{max(I)} - Y_{min(I)})$$
(71)

6. Cálculo de sobretensiones.

$$N_{Cd} = 2 \cdot N_g \cdot 0, 1 \cdot \sum_{I=1}^{200} P_i(I) \cdot Y_{\min(I)}$$
(72)



Figura 48. Determinación de la tasa de contorneamiento. Uso de los modelos electrogeométrico y de Rusck

Resultando, la tasa o número de contorneamientos por descargas directas e indirectas por 100 km y año en la línea de distribución:

$$N_{\rm C} = N_{\rm Cd} + N_{\rm Ci} \tag{73}$$

6.2.2 Cálculo sistemático

6.2.2.1 Línea sin apantallar

En este apartado realizaremos un cálculo sistemático de la tasa de contorneamiento para la línea supuesta en este mismo capítulo, ver *Figura 28*.

A su vez se verá la relación o no de determinados parámetros con la tasa de contorneamientos. El valor de CFO de la línea será de 150 kV excepto en la observación de la tasa de contorneamientos en relación al nivel de CFO de la línea. La resistividad del terreno se supondrá constante uniforme con un valor de 200 Ω m, excepto en la observación de la tasa de contorneamientos en relación al valor de la resistividad del terreno. La velocidad será expresada en función de la intensidad según la expresión (*16*), excepto en el estudio de la tasa de contorneamientos en función de la intensidad según la valor de la velocidad de la descarga del rayo. La implementación de los cálculos ha sido realizada mediante MatLab.

Tabla 7. Tasa de contorneamientos. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad, CFO=150kV, ρ =200 Ω m.

Velocidad de retorno (km/s)	Tipo de descarga	Tasa de contorneamientos
En función de I	Descargas directas	12.3341
v=0,5·erf(0,016·I)	Descargas indirectas	2.2353
	Total	14.5695

Tabla 8. Tasa de contorneamientos en función del nivel de aislamiento CFO, Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad, ρ =200 Ω m.

CFO	Tipo de descarga	Tasa de
		contorneamientos
	Descargas directas	12.3341
50	Descargas indirectas	27.7880
	Total	40.1222
	Descargas directas	12.3341
100	Descargas indirectas	7.9141
	Total	20.2482
	Descargas directas	12.3341
150	Descargas indirectas	2.2353
	Total	14.5695
	Descargas directas	12.3341
200	Descargas indirectas	0.5690
	Total	12.9031
250	Descargas directas	12.3341
	Descargas indirectas	0.1246
	Total	12.4588
	Descargas directas	12.3341
300	Descargas indirectas	0.01489
	Total	12.3490

Velocidad de retorno	Tipo de descarga	Tasa de
(km/s)		contorneamientos
	Descargas directas	12.3338
30000	Descargas indirectas	2.9023
	Total	15.2361
	Descargas directas	12.3338
90000	Descargas indirectas	4.4669
	Total	16.8008
150000	Descargas directas	12.3338
	Descargas indirectas	6.3835
	Total	18.7174

Tabla 9. Tasa de contorneamientos en función de la velocidad de retorno del rayo. CFO=150kV, ρ =200 Ω m.

Tabla 10. Tasa de contorneamientos en función de la resistividad del terreno. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad, CFO=150kV.

Resistividad del terreno (Ωm)	Tipo de descarga	Tasa de contorneamientos
()	Descargas directas	11.8595
1	Descargas indirectas	0.6884
	Total	12.5479
	Descargas directas	11.9881
20	Descargas indirectas	1.0135
	Total	13.0016
	Descargas directas	12.0828
50	Descargas indirectas	1.2986
	Total	13.3815
	Descargas directas	12.1880
100	Descargas indirectas	1.6596
	Total	13.8477
	Descargas directas	12.3341
200	Descargas indirectas	2.2353
	Total	14.56959
	Descargas directas	12.6149
500	Descargas indirectas	3.5600
	Total	16.1749
	Descargas directas	12.9175
1000	Descargas indirectas	5.2553
	Total	18.1728

Podemos observar como la tasa de contorneamientos por descargas directas a los conductores de fase con una velocidad de la descarga en función de la intensidad es

prácticamente independiente del parámetro a estudiar, así mismo podemos ver como también permanece independiente para velocidades constantes sean cuales sean. Por lo general un impacto en un conductor de fase se considerará que origina contorneamiento en el 100% de las ocasiones, es por esto que la tasa de descargas directas permanece estable incluso con la variación del *CFO* a niveles de 300 kV.

En el caso de las descargas indirectas vemos como la velocidad juega un papel importante, con el incremento de la velocidad de la descarga del rayo hay un incremento de la tensión inducida y por ende un aumento en la tasa de contorneamientos. Vemos como el nivel de aislamiento ante una tensión crítica de contorneamiento, *CFO*, juega un papel crucial en cuanto a la tasa de contorneamientos por descargas indirectas, se puede apreciar cómo se ha comentado anteriormente a nivel teórico, que un nivel de aislamiento por tensión crítica de contorneamiento igual a los 300 kV disminuye los efectos de las descargas indirectas casi en tu totalidad.

El efecto de la resistividad del terreno se puede observar en ambos casos, tanto en descargas directas como en descargas indirectas, se aprecia un ligero aumento de la tasa de contorneamientos en función del aumento de la resistividad del terreno, aunque este aumento es muy pequeño.

6.2.2.2 Línea con cable de tierra

Para el cálculo de la tasa de contorneamientos en una línea apantallada por un cable de tierra, el procedimiento será muy parecido al descrito en el punto 6.2.1 utilizado para líneas sin apantallar pero con ligeras modificaciones que veremos a continuación:

- En lugar de encontrar una $Y_{min(I)}$ para la cual el rayo impacta en la línea mediante la ecuación (21), al tener cable de tierra utilizaremos la expresión (31) y encontraremos la Zona de protección (la cual indica que la descarga impactará en el cable de tierra, tratados como cebados inversos en el estudio) y la Zona de falla (la cual indica que la descarga impactará en los conductores de fase, considerando que produce contorneamiento en todas las ocasiones).
- Nuevamente para cada valor de la intensidad obtendremos esta vez la distancia máxima $(Y_{max(I)} \circ D_{max(I)})$ para la cual el rayo puede producir un contorneamiento en la línea de distribución. La distancia máxima se obtendrá resolviendo la ecuación (64) para una tensión inducida igual a 1,5·CFO. Obviamente para que las descargas vayan a tierra $Y_{min(I)}$ debe ser menor que $Y_{max(I)}$, y en este caso, y en este caso $Y_{min(I)}$ vendrá determinado como hemos visto por la Zona de protección y falla.
- Se variará la intensidad entre 1 y 200 kA, pero teniendo en cuenta los siguientes intervalos:
 - entre 1 y 200kA, para el cálculo del número de contorneamientos por impactos a tierra en las cercanías.

- o entre I_c , y 200 kA, para el cálculo del número de contorneamientos por cebados inversos; I_c es la intensidad crítica del rayo a partir de la cual se originará el contorneamiento calculada según la expresión (51).
- o entre 1 kA e I_{max} , para el cálculo del número de contorneamientos por descargas directas a la fase, I_{max} es la intensidad máxima del rayo por encima de la cual el conductor de fase se encuentra apantallado efectivamente por el cable de tierra, como hemos visto en la *Figura 38* es aproximadamente unos 18 kA.
- Se calcula la probabilidad $P_i(I)$, esta será la diferencia entre la probabilidad de la intensidad de ser igual o superar el límite inferior y la probabilidad de la intensidad de ser igual o superar el límite superior inmediato. Según recomendaciones del *IEEE* se utiliza la expresión (14).

También se calcula la probabilidad de que la intensidad de la descarga del rayo sea superior a la intensidad crítica (51) mediante la propia expresión (14).

Finalmente las expresiones para la obtención de la tasa de contorneamientos para una línea apantallada quedarán así (tras la leve modificación de las expresiones para líneas sin apantallar):

$$N_{Ci} = 2 \cdot N_{g} \cdot 0, 1 \cdot \sum_{I=1}^{200} P_{i}(I) \cdot (Y_{max(I)} - (Z_{p(I)} + Z_{f(I)}))$$
(74)

$$N_{Cd} = 2 \cdot N_g \cdot 0, 1 \cdot \sum_{I=1}^{I_{max}} P_i(I) \cdot Z_{f(I)}$$
(75)

$$N_{Cci} = 0, 6 \cdot 2 \cdot N_g \cdot 0, 1 \cdot \sum_{I=I_c}^{200} P_{ci}(I) \cdot P_i(I) \cdot Z_p(I)$$
(76)

Donde:

 N_{Cci} : Es la tasa de contorneamientos por cebados inversos. $P_{ci(I)}$: Es la probabilidad de que *I* sea superior a I_c .

Esta expresión se multiplica por 0,6 para considerar que solo el 60% de los impactos que caen suficientemente cerca de un poste pueden provocar contorneamiento.

Así pues la tasa total de contorneamientos por 100 km y año para la línea se calcularía:

$$N_{C} = N_{Cd} + N_{Ci} + N_{Cci}$$
(77)

Tabla 11. Tasa de contorneamien	tos. Velocidad de retorno del ra	ayo en función de la intensidad, CFO=150kV	,
ρ=	=200Ωm, Resistencia de puesta	a tierra= 50Ω .	

Velocidad de retorno (km/s)	Tipo de descarga	Tasa de contorneamientos
En función de I	Descargas directas	0.1134
$v=0,5 \cdot erf(0,016 \cdot I)$	Descargas indirectas	0.9156
	Total	8.2721

Tabla 12. Tasa de contorneamientos en función del nivel de aislamiento CFO, Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad, ρ =200 Ω m, Resistencia de puesta a tierra=50 Ω .

CFO	Tipo de descarga	Tasa de
		contorneamientos
	Descargas directas	0.1134
50	Cebado inverso	8.3649
	Descargas indirectas	26.0431
	Total	34.5215
	Descargas directas	0.1134
100	Cebado inverso	7.9831
	Descargas indirectas	6.0118
	Total	14.1085
	Descargas directas	0.1134
150	Cebado inverso	7.2431
	Descargas indirectas	0.9156
	Total	8.2721
	Descargas directas	0.1134
200	Cebado inverso	6.2530
	Descargas indirectas	0.0770
	Total	6.4435
	Descargas directas	0.1134
250	Cebado inverso	5.1932
	Descargas indirectas	0
	Total	5.3066
	Descargas directas	0.1134
300	Cebado inverso	4.2101
	Descargas indirectas	0
	Total	4.3235

6. Cálculo de sobretensiones.

Velocidad de retorno (km/s)	Tipo de descarga	Tasa de contorneamientos
	Descargas directas	0.1134
30000	Cebado inverso	7.2431
	Descargas indirectas	1.3869
	Total	8.7434
	Descargas directas	0.1134
90000	Cebado inverso	7.2431
	Descargas indirectas	2.6869
	Total	10.0434
	Descargas directas	0.1134
150000	Cebado inverso	7.2431
	Descargas indirectas	4.4911
	Total	11.8476

Tabla 13. Tasa de contorneamientos en función de la velocidad de retorno del rayo. CFO=150kV, ρ =200 Ω m, Resistencia de puesta a tierra=50 Ω .

Tabla 14. Tasa de contorneamientos en función de la resistencia de la puesta a tierra del cable de tierra. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad, CFO=150kV, ρ =200 Ω m.

Resistencia	Tipo de descarga	Tasa de
(Ω)		contorneamientos
	Descargas directas	0.1134
10	Cebado inverso	2.6448
	Descargas indirectas	0.9156
	Total	3.6738
	Descargas directas	0.1134
50	Cebado inverso	7.2431
	Descargas indirectas	0.9156
	Total	8.2721
	Descargas directas	0.1134
100	Cebado inverso	7.7259
	Descargas indirectas	0.9156
	Total	8.7549

Cuando la línea está apantallada, la tasa de contorneamiento por descargas directas disminuye considerablemente. Aunque aparecen los cebados inversos, la suma de tasas por descargas directas y por cebados inversos es más baja que la resultante por descargas directas en el caso de que la línea no tenga cable de tierra. Esta reducción depende sobre todo de la tensión de contorneamiento de línea y de la resistencia de la puesta a tierra de los postes.

Aunque el apantallamiento de los conductores de fase es prácticamente total, la reducción más importante se encuentra en la tasa de contorneamientos por descargas indirectas, esta reducción es considerable.

6. Cálculo de sobretensiones.

En el caso de los cebados inversos podemos observar como el parámetro más importante en el cálculo de su tasa de contorneamientos es la resistencia de la puesta a tierra del poste junto con el nivel de aislamiento de la línea, *CFO*, este último de menor importancia.

En referencia a las descargas indirectas están siguen una evolución muy similar dependiendo del parámetro a lo visto para una línea sin apantallar.

Resistividad del terreno	Tipo de descarga	Tasa de
(Ωm)		contorneamientos
	Descargas directas	0.0550
1	Cebado inverso	6.3854
	Descargas indirectas	0.0866
	Total	6.5271
	Descargas directas	0.0676
20	Cebado inverso	7.2429
	Descargas indirectas	0.2032
	Total	7.5138
	Descargas directas	0.0782
50	Cebado inverso	7.2636
	Descargas indirectas	0.3333
	Total	7.6752
	Descargas directas	0.0916
100	Cebado inverso	7.2598
	Descargas indirectas	0.5314
	Total	7.8829
	Descargas directas	0.1134
200	Cebado inverso	7.2431
	Descargas indirectas	0.9156
	Total	8.2721
	Descargas directas	0.1661
500	Cebado inverso	7.1987
	Descargas indirectas	2.0563
	Total	9.4211
	Descargas directas	0.2420
1000	Cebado inverso	7.1397
	Descargas indirectas	3.8416
	Total	11.2277

Tabla 15. Tasa de contorneamientos en función de la resistividad del terreno. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad, CFO=150kV, ρ =200 Ω m, Resistencia de puesta a tierra=50 Ω .

7. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto ha sido ofrecer una visión panorámica de la problemática que suponen las descargas atmosféricas en relación a las líneas aéreas de distribución.

Se ha tratado de mostrar información sobre el rayo o descarga atmosférica en sí mismo, y sobre el comportamiento de las líneas aéreas de distribución contemplando para ello el caso de una línea con y sin apantallamiento.

Se ha realizado un cálculo paramétrico de las sobretensiones originadas por los rayos para poder observar que parámetros del rayo o línea influyen sobre las tensiones inducidas y así a su vez sobre la tasa de contorneamientos. Para el cálculo de las sobretensiones inducidas por descargas que impactan a tierra en las cercanías (descargas indirectas) se ha empleado el método de Rusck (por su simplicidad y ser recomendado por el *IEEE*).

Las principales conclusiones más importantes tras el estudio realizado tanto a nivel teórico como a nivel de cálculo en el presente proyecto son:

- Las descargas atmosféricas en líneas de distribución constituyen un gran porcentaje de las fallas en el sistema y en los equipos a este nivel de tensión, debido a su bajo nivel de aislamiento. Se ha podido comprobar como para un correcto aislamiento el valor del voltaje crítico de contorneamiento de la línea debería estar entre los 250 y 300 kV.
- Para el caso de las líneas apantalladas se observa como el cable de tierra ofrece una protección contra sobretensiones inducidas por descargas indirectas muy importante, a su vez, la efectividad del cable de tierra queda demostrada que estará altamente relacionada con el valor de la resistencia de puesta a tierra en el poste, el cual de una forma ideal no debería ser superior los 10 Ω .
- La aparición de contorneamientos por cebados inversos en lugar de contorneamientos por descargas directas a un conductor de fase, logra reducir considerablemente el número de contorneamientos aparecidos en la línea como descargas directas si esta no tuviese el cable de tierra.
- Existen factores intrínsecos en la aleatoriedad del rayo que no podemos controlar, pero en el diseño de líneas de distribución hay muchos factores en los cuales el ingeniero de diseño puede trabajar, tales como: elección de un buen recorrido comportando factores de protección por edificios o árboles, elección de un correcto nivel de *CFO*, La posibilidad de mediante el trazado de la línea estudiar y trabajar el efecto de la resistividad del terreno, la implementación de una toma de tierra efectiva, etc.
- Queda expuesto en la bibliografía actual que el beneficio en relación al coste de la protección de una línea de distribución mediante cable de tierra puede ser sustancialmente grande.

8. Bibliografía

[1] P. Chowdhuri., "Parameters of Lightning Strokes: A Review", Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee; IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, january 2005.

[2] Heidler, F., "Parameters of lightning current given in IEC 62305 – background, experience and outlook", 29th International Conference on Lightning Protection, June 2008.

[3] González Molina, F., "Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas distribución frente a sobretensiones de origen externo", UPC – 2001.

[4] IEEE Std. 1410-2010. "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", (Revision of IEEE Std 1410-2004).

[5] IEEE Std. 1410-2004. "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines".

[6] Rusck, S., "Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines With Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks", transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, no. 120, 1958.

[7] IEEE Working Group Report, "Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines," IEEE Transactions on Power Delivery vol. 5, no. 3, pp. 1408–1417, July 1990.

[8] A. Greenwood., "Electrical transients in power systems", 1991.

[9] Darveniza, M., "A practical extension of Rusck's formula for maximum lightning induced voltage that accounts for ground resistivity", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD 22, no. 1 pp 605-612, Jan 2007.

[10] Borghetti, A., Nucci, C. A., Paolone, M., "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 684 – 692, Jan 2007.

[11] Mikropoulos, P. N., "Statistical Method for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines", High Voltage Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Aristotle University of Thessaloniki.