

# Resumen

Las redes de distribución (de media tensión), encargadas de distribuir la energía eléctrica desde la red de transporte hasta el usuario final, están sujetas a perturbaciones que pueden afectar a la calidad de la energía eléctrica suministrada. Cuando los equipos y la aparamenta de estas redes son afectados por sobretensiones provocadas por descargas atmosféricas, pueden producirse daños que afectan a todo el sistema de distribución y por lo tanto a los usuarios finales. Por esta razón, la aparamenta y los equipos de las redes de distribución suelen protegerse con descargadores de sobretensión o pararrayos. Sin embargo, los niveles de sobretensión producidos por los rayos en redes aéreas son extremadamente elevados por lo que se producen faltas en los aisladores que son despejadas, en el mejor de los casos, por los elementos de protección. Como consecuencia, los usuarios finales pueden verse afectados viendo huecos de tensión, una calidad de onda afectada o interrupciones del servicio.

En los últimos años, con el incremento del número de cargas sensibles conectadas al sistema eléctrico, las pérdidas económicas por las sobretensiones producidas por rayos pueden ser importantes por lo que cada vez es más común proteger, además de los equipos conectados, los aisladores de la red. De esta forma, por un lado es posible evitar que un rayo afecte a la calidad de suministro de los clientes y por otro, los aislamientos de la red se ven menos deteriorados obteniendo en un beneficio económico.

En este proyecto se ha implementado una metodología para realizar una previsión del número de contorneos producidos por las descargas atmosféricas en las proximidades de las redes de distribución. Posteriormente, se ha desarrollado, mediante algoritmos genéticos, un método para la optimización del número y ubicación de los pararrayos teniendo en cuenta las perturbaciones producidas por rayos indirectos. La optimización se realiza a partir de la valoración económica de los beneficios de instalar pararrayos (valorados a partir de la disminución de la energía no suministrada y del coste de la inversión) de manera que a partir de un conjunto de posibles soluciones generadas de forma aleatoria, mediante un proceso iterativo, se generan nuevas soluciones con características similares (número de pararrayos y ubicación) a las mejores soluciones de la iteración anterior. De esta forma, en cada iteración se tiene un escenario mejor adaptado a la función objetivo. Finalmente, la metodología desarrollada se ha simulado a una red de distribución.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Prefacio</b>	<b>13</b>
<b>Introducción</b>	<b>15</b>
<b>1. Estado del arte sobre las protecciones contra sobretensiones producidas por descargas atmosféricas</b>	<b>17</b>
1.1. Introducción . . . . .	17
1.2. Cálculo de sobretensiones inducidas . . . . .	18
1.2.1. Modelos de corriente de retorno . . . . .	19
1.2.2. Cálculo del campo electromagnético . . . . .	20
1.2.3. Modelos de acoplamiento . . . . .	21
1.3. Protecciones contra descargas atmosféricas . . . . .	22
<b>2. El fenómeno de la descarga atmosférica</b>	<b>25</b>
2.1. Clasificación de las descargas . . . . .	25
2.2. Proceso de formación de la descarga . . . . .	26
<b>3. Caracterización del rayo</b>	<b>27</b>
3.1. Forma de la onda de corriente . . . . .	27
3.2. Parámetros representativos del rayo . . . . .	28
3.2.1. Punto de impacto de la descarga. Modelo electrogeométrico . . . . .	29
3.2.2. Predicción de la densidad de descargas . . . . .	31
<b>4. Cálculo de sobretensiones</b>	<b>33</b>
4.1. Sobretensiones por descargas directas . . . . .	33
4.2. Sobretensiones por descargas indirectas . . . . .	34
4.2.1. Cálculo simplificado. Fórmula de Rusck . . . . .	34
4.2.2. Cálculo de sobretensiones inducidas. Método de Agrawal . . . . .	35

<b>5. Metodología para evaluar la tasa de contorneos por descargas indirectas</b>	<b>39</b>
5.1. Tasa de contorneos para una línea aérea de distribución rectilínea y de longitud infinita . . . . .	40
5.1.1. Tasa de contorneos para una línea sobre un terreno perfectamente conductor . . . . .	40
5.1.2. Tasa de contorneos según la conductividad del terreno para una línea aérea de distribución infinita . . . . .	46
5.2. Influencia de las ramificaciones y terminaciones . . . . .	46
<b>6. Modelado de los pararrayos</b>	<b>49</b>
<b>7. Algoritmo genético para optimizar el número y la ubicación de pararrayos</b>	<b>51</b>
7.1. Introducción . . . . .	51
7.2. Fundamentos de los algoritmos genéticos . . . . .	51
7.3. Codificación de un individuo . . . . .	53
7.4. Generación de la primera población . . . . .	54
7.5. Función objetivo . . . . .	54
7.5.1. Determinación de la función objetivo . . . . .	54
7.5.2. Número de casos a simular . . . . .	58
7.5.3. Evaluación final . . . . .	59
7.6. Selección de padres . . . . .	60
7.7. Reproducción . . . . .	61
7.8. Mutación . . . . .	61
7.9. Finalización . . . . .	62
7.10. Implementación de la metodología . . . . .	62
<b>8. Aplicación de la metodología a una red de distribución</b>	<b>65</b>
8.1. Línea con extremos abiertos y CFO constante . . . . .	67
8.2. Línea con extremos abiertos y CFO no constante . . . . .	70
8.3. Línea con impedancia característica en extremos . . . . .	73
<b>Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>77</b>
<b>A. Presupuesto</b>	<b>79</b>
A.1. Introducción . . . . .	79
A.2. Presupuesto para el proyecto de protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas a tierra mediante pararrayos en líneas aéreas de media tensión . . . . .	79



Protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas a tierra mediante pararrayos en líneas aéreas de media tensión	5
A.2.1. Material informático . . . . .	79
A.2.2. Presupuesto de la mano de obra . . . . .	80
A.2.3. Suma por capítulos . . . . .	80
<b>B. Impacto ambiental</b>	<b>81</b>
B.1. Impacto en la fabricación e instalación de pararrayos . . . . .	81
B.2. Impacto en la explotación . . . . .	82
<b>C. Resolución del modelo Agrawal para la implementación en EMTP-ATP</b>	<b>83</b>
<b>D. Determinación del paso de integración en el EMTP-ATP</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>



# Índice de figuras

1.1. Geometría en el cálculo de campos electromagnéticos . . . . .	21
2.1. Clasificación de los rayos entre nube y tierra . . . . .	25
2.2. Estructura tripolar de las nubes de tormenta . . . . .	26
3.1. Forma de onda de la corriente de un rayo de categoría 1 . . . . .	28
3.2. Onda de corriente del rayo en doble rampa . . . . .	28
3.3. Representación gráfica del modelo electrogeométrico para una línea monofásica sin apantallar . . . . .	30
4.1. Impacto directo de un rayo . . . . .	33
4.2. Procedimiento para el cálculo de sobretensiones inducidas por descargas indirectas . . . . .	34
4.3. Representación de la línea y su esquema equivalente según el modelo de Agrawal . . . . .	36
4.4. Esquema equivalente del modelo implementado en el EMTP-ATP para el cómputo de sobretensiones inducidas por descargas indirectas . . . . .	37
5.1. Tasa de contorneos según el número de simulaciones y el CFO . . . . .	41
5.2. Algoritmo para el cálculo de la tasa de contorneos para una línea aérea de longitud infinita sobre un terreno perfectamente conductor. Cálculo de sobretensiones mediante la ecuación de Rusck . . . . .	42
5.3. Algoritmo para el cálculo de la tasa de contorneos para una línea aérea de longitud infinita sobre un terreno perfectamente conductor. Cálculo de sobretensiones mediante el programa EMTP-ATP . . . . .	43
5.4. Tasas de contorneo en una línea aérea infinita sobre un terreno perfectamente conductor. En azul según Rusck y ley uniforme para la velocidad de retorno, en verde según Rusck y velocidad de retorno = $1,2 \cdot 10^8$ m/s, en rojo según la norma IEEE std 1410-2004 (fórmula de Rusck con velocidad de retorno constante de $1,2 \cdot 10^8$ m/s), en negro mediante EMTP-ATP y en morado según la norma IEEE std 1410-2010 . . . . .	44
5.5. Tasas de contorneo según el número de simulaciones y el CFO . . . . .	45
5.6. Comparación de la tasa de contorneos mediante la fórmula de Rusck (corriente en escalón) y mediante el modelo de Agrawal (corriente en doble rampa y $t_c = 1 \mu s$ ) . . . . .	45

5.7.	Tasa de contorneos según la conductividad del terreno y el CFO . . . . .	46
5.8.	Punto de discontinuidad . . . . .	47
5.9.	Reflexión y transmisión de ondas en una bifurcación . . . . .	47
5.10.	Geometría de la línea e impacto de un rayo . . . . .	48
5.11.	Sobretensión en el nodo 11 producida por un rayo según la configuración de la línea . . . . .	48
6.1.	Representación del modelo de pararrayos utilizado . . . . .	49
6.2.	Curva característica para las resistencias no lineales $A0$ y $A1$ . La tensión está referida a $V_{r8/20}$ . $V_{r8/20}$ es el valor de pico de la tensión residual en el pararrayos en un ensayo tipo rayo con un impulso de 10 kA y forma de onda $8/20 \mu s$ . . . . .	50
7.1.	Representación del diagrama de flujos de un GA . . . . .	53
7.2.	Representación de un posible individuo en una red de 12 torres. 4 pararrayos situados en las torres 1, 5, 7 y 8 . . . . .	54
7.3.	Histograma de las sobretensiones máximas y su distribución de probabilidad normal-logarítmica . . . . .	55
7.4.	Riesgo de contorneo por una descarga indirecta . . . . .	55
7.5.	Histograma de los máximos márgenes de sobretensión . . . . .	56
7.6.	Histograma de los máximos márgenes desplazados y su distribución de probabilidad normal-logarítmica para un CFO constante de 75 kV . . . . .	57
7.7.	Bondad del ajuste de la distribución de probabilidad . . . . .	57
7.8.	Errores en el ajuste de la distribución de probabilidad referidos al ajuste con una simulación de 1000 rayos y tiempo de cómputo aproximado en función del número de rayos . . . . .	59
7.9.	Histograma de los máximos márgenes desplazados y su distribución de probabilidad normal-logarítmica para un CFO constante de 75 kV y pararrayos instalados . . . . .	60
7.10.	Bondad del ajuste de la distribución de probabilidad . . . . .	60
7.11.	Proceso de reproducción . . . . .	61
7.12.	Esquema del algoritmo genético . . . . .	63
8.1.	Geometría de la red de estudio y numeración de los apoyos . . . . .	65
8.2.	Esquema eléctrico en el EMTP-ATP de dos vanos de línea y un pararrayos . . . . .	66
8.3.	Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (primera ejecución). CFO constante . . . . .	68
8.4.	Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (segunda ejecución). CFO constante . . . . .	69
8.5.	Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (primera ejecución). CFO no constante . . . . .	71

Protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas a tierra mediante pararrayos en líneas aéreas de media tensión	9
--	---

8.6. Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (segunda ejecución). CFO no constante . . . . .	72
8.7. Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA. Impedancia característica en extremos . . . . .	74
C.1. Esquema equivalente del modelo implementado en el EMTP-ATP para el cómputo de sobretensiones inducidas por descargas indirectas . . . . .	85
D.1. Caída del rayo para el análisis del paso de integración . . . . .	88
D.2. Análisis del paso de integración. Configuración 1 . . . . .	89
D.3. Análisis del paso de integración. Configuración 2 . . . . .	90
D.4. Análisis del paso de integración. Configuración 3 . . . . .	91
D.5. Análisis del paso de integración. Configuración 4 . . . . .	92



# Índice de tablas

1.1. Comparación de las tres implementaciones del modelo Agrawal . . . . .	23
3.1. Distribuciones log-normal adoptadas . . . . .	29
3.2. Constantes de la distancia de ruptura . . . . .	30
8.1. Características del pararrayos . . . . .	66
A.1. Presupuesto del material informático . . . . .	79
A.2. Presupuesto de la mano de obra . . . . .	80
A.3. Presupuesto total del proyecto . . . . .	80
D.1. Parámetros del rayo . . . . .	88



# Prefacio

Los rayos son una de las causas principales de fallo en las líneas aéreas de media tensión. Este fenómeno atmosférico ha sido estudiado desde muchos años atrás, pero debido a los requerimientos actuales de calidad en la entrega de energía eléctrica así como la capacidad tecnológica de protección con nuevos sistemas de pararrayos, en los últimos años se han intensificado los estudios y métodos para evaluar los efectos del rayo, apareciendo modelos eficaces para el cálculo de sobretensiones mediante software especializado a partir de los cuales se ha determinado que la protección de los aisladores de las redes aéreas mediante pararrayos puede resultar eficaz. Tal es así que en la norma publicada en el 2010 (IEEE std. 1410-2010) del IEEE se sugiere que una distancia entre pararrayos de 300 metros puede resultar efectiva en el comportamiento de la red frente al rayo.

Partiendo de la idea que el uso de pararrayos para proteger el aislamiento de una red puede resultar efectivo, la tendencia actual es intentar establecer la ubicación óptima de pararrayos. En este sentido, este proyecto viene motivado por la petición de una empresa distribuidora de energía eléctrica de crear el diseño de una aplicación para la ubicación óptima de pararrayos en redes aéreas de media tensión.

Este proyecto ha sido realizado en el Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). El CITCEA-UPC lleva más de 10 años trabajando, desarrollando, innovando y aportando conocimiento a empresas e instituciones en los campos de la electrónica y electrotecnia. Este proyecto no tiene antecedentes similares dentro del CITCEA-UPC lo que supone un reto que puede abrir nuevas líneas de investigación y conocimiento dentro del entorno.



# Introducción

Esta es la memoria del proyecto Protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas a tierra mediante pararrayos en líneas aéreas de media tensión. Este proyecto ha sido desarrollado en el entorno MATLAB ® y con la utilización de un programa externo de simulación (EMTP-ATP).

La memoria está dividida en ocho capítulos:

El capítulo 1 está enfocado a describir el estado del arte sobre los temas relacionados con este trabajo como los sistemas de protección contra descargas atmosféricas y la simulación de sobretensiones inducidas por rayos en redes aéreas.

El capítulo 2 está orientado, de manera introductoria, a la descripción de la formación y clasificación de los rayos.

En el capítulo 3 se caracterizan los parámetros más importantes del rayo que deben tenerse en consideración cuando se realizan estudios estadísticos relacionados con este fenómeno.

El capítulo 4 está destinado al cálculo de sobretensiones. Se introduce brevemente el cálculo de las sobretensiones por rayos directos a los conductores de fase y se detallan dos métodos de cálculo de sobretensiones por rayos indirectos (a tierra) presentando el modelo de línea utilizado.

A partir de las características definidas en el capítulo 3 y el cálculo de sobretensiones descrito en el capítulo 4 es posible realizar un estudio estadístico de las sobretensiones producidas por rayos y realizar una previsión de la tasa de contorneos en una línea aérea.

A partir del estudio estadístico, en el capítulo 5 se implementa una metodología para el cálculo de las tasas de contorneo en una línea aérea de distribución (de media tensión). Esta metodología se aplica mediante los dos métodos de cálculo de sobretensiones por rayos indirectos descritos en el capítulo 4 y se comparan los resultados con los que se obtienen en otras referencias de la literatura. Adicionalmente se explica el efecto que pueden tener las terminaciones de una línea aérea o sus ramificaciones en las sobretensiones que aparecen cuando surge una descarga atmosférica.

Una vez se ha implementado una metodología para prever el número de contorneos por rayos indirectos, en el capítulo 6 se presenta la modelización del pararrayos que será utilizado en el siguiente capítulo.

En el capítulo 7 se desarrolla una metodología basada en algoritmos genéticos para tratar de encontrar una solución óptima en el número de pararrayos a instalar y su ubicación según un criterio económico.

En el capítulo 8 se muestran algunos ejemplos de aplicación de la metodología desarrollada.

Finalmente se exponen las conclusiones obtenidas y se proponen nuevas líneas de investigación a realizar en trabajos futuros.

## Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una metodología para determinar la ubicación óptima de pararrayos según un criterio económico desde el punto de vista de una compañía de distribución. Para conseguirlo, se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- Estudiar el estado del arte sobre las protecciones por descargas atmosféricas y los métodos para realizar previsiones de contorneos en una red aérea, es decir, métodos de cálculo de sobretensiones.
- Implementar el método más adecuado para la previsión del número de contorneos en los aisladores de una red aérea según las necesidades del problema.
- Definir la modelización del pararrayos para el cómputo de sobretensiones atmosféricas mediante el EMTP-ATP.
- Desarrollar una metodología para la selección óptima del número de pararrayos y su ubicación a partir de las previsiones de contorneos.
- Aplicar la metodología desarrollada en una red aérea de media tensión para verificar su funcionamiento correcto.

## Alcance

De acuerdo con la complejidad en el cálculo de sobretensiones por rayos indirectos en las redes aéreas de media tensión y la gran cantidad de simulaciones a realizar, el problema se simplifica teniendo en cuenta que la línea es ideal cuya consideración puede ser válida en redes pequeñas. Adicionalmente no se considera el efecto corona que pudiera aparecer en las sobretensiones producidas por rayos indirectos.

En este proyecto hay que tomar las siguientes consideraciones:

- La climatología puede cambiar mucho de un año para otro por lo que se deben interpretar las previsiones como lo que son, previsiones.
- El proyecto se realiza considerando una red monofásica sin cable de guarda.
- Dado que las características del entorno de las redes resulta un aspecto muy particular en cada caso, en el estudio se considera que la red está en campo abriendo los efectos de atracción de rayos que puedan generar los objetos cercanos.
- La valoración económica del coste de un contorneo se realiza a partir del precio de la energía no suministrada cuando se produce una falta. No se tienen en cuenta penalizaciones por parámetros de calidad de la energía.

## Capítulo 1

# Estado del arte sobre las protecciones contra sobretensiones producidas por descargas atmosféricas

### 1.1. Introducción

El conocimiento sobre el fenómeno del rayo y sus características es fundamental para proteger las líneas aéreas frente a las descargas atmosféricas. En el estudio de la física del rayo, existen diferentes teorías sobre su formación siendo la teoría de Schondland la más aceptada.

En el ámbito de la ingeniería el rayo, o más concretamente la descarga de retorno, se caracteriza como una fuente de corriente. Para la caracterización de estas fuentes se han realizado estudios estadísticos a partir de mediciones reales de las descargas atmosféricas encontrando distribuciones de probabilidad para los diferentes parámetros del rayo. En [1] y [2] se muestra un resumen de los parámetros recomendados para el modelado de las fuentes de corriente mencionadas, estos parámetros pueden variar dependiendo de la zona geográfica. Por otro lado, la forma de la onda recomendada puede ser muy complicada de modelar. Una simplificación muy común es representar la corriente de retorno como una doble rampa tal y como se ha hecho en [3] [4] y [5]. En este caso, los parámetros característicos son la corriente de cresta, el tiempo de subida o de frente y el tiempo de cola.

En el estudio de los rayos y su efecto sobre las líneas aéreas, se tienen en cuenta tres tipos de rayos:

- Rayos que impactan directamente en los conductores de fase, también llamados rayos directos.
- Rayos que impactan en las torres o, cuando la red dispone de cable de guarda, los rayos que impactan en este mismo cable.
- Rayos que impactan a tierra en las cercanías de las líneas, también llamados rayos indirectos.

Las descargas directas provocan sobretensiones de grandes magnitudes que pueden llegar a ser del orden de los MV. Las redes aéreas de distribución tienen aislamientos que no son capaces de soportar estas tensiones por lo que prácticamente siempre se producirá un contorneo en los aisladores. Así pues, debe asumirse que la única forma de protegerse en una red de distribución es evitar el impacto desviando la descarga mediante cables de guarda. En cambio en las líneas de transporte, la colocación de descargadores de sobretensión puede disminuir considerablemente el número de contorneos por descargas directas.

Las descargas que impactan en las torres o en los cables de guarda son derivadas a tierra a través de una impedancia. Esto provoca una elevación en el potencial de la torre pudiendo terminar como lo que se conoce como contorneo inverso. La forma de disminuir la sobretensión en la torre y por lo tanto la probabilidad de contorneo inverso consiste en reducir la impedancia de puesta a tierra o en la colocación de descargadores de sobretensión. También puede resultar efectivo realizar una combinación de cables de guarda y descargadores de sobretensión. Colocar un cable de guarda disminuye los impactos directos, pero aumenta la probabilidad de tener un contorneo inverso por el hecho de atraer a los rayos hacia él, pero con la colocación de descargadores, el potencial en las torres se ve limitado y puede reducirse la probabilidad de contorneo inverso. Según [2], el uso combinado de cables de guarda y descargadores puede ser más efectivo que mejorar las tomas de tierra en todas las torres.

Finalmente, las descargas indirectas producen sobretensiones inducidas a lo largo de la red. Estas sobretensiones suelen ser menores que las anteriores por lo que en las líneas aéreas de transporte no suelen provocar contorneos debido su elevado nivel de aislamiento. En las líneas de distribución en cambio, es posible que se produzca el contorneo de los aisladores y, teniendo en cuenta que las descargas indirectas son más comunes que las anteriores, éstas deben tenerse en cuenta. A este fin se han realizado numerosos estudios para calcular las sobretensiones inducidas por descargas indirectas y se ha verificado que el uso de descargadores puede reducir significativamente el número de contorneos. Así pues, resulta interesante estudiar dónde deben colocarse los descargadores para tener el mejor escenario, lo cual es el objetivo de este proyecto.

En resumen, para las líneas aéreas de distribución, los rayos directos en los conductores de fase, en los cables de guarda (en caso de que la línea disponga) o en las estructuras (torres) suelen causar contorneo de los aisladores entre fases o entre fase y tierra mientras que los rayos indirectos tienen una probabilidad menor. El contorneo de un aislador produce un cortocircuito que no suele causar un daño permanente en la red cuando su duración es limitada por dispositivos de protección. Según [6], alrededor de un 5% – 10% de las faltas producidas por rayos terminan en daños permanentes y por lo tanto (dada la estructura radial de las redes de distribución) una interrupción del servicio. Por otro lado, la actuación de los dispositivos de protección cuando se produce un cortocircuito (asociado a un contorneo) produce una interrupción de corta duración [7]. Estas interrupciones podían ser aceptables en el pasado pero actualmente, y teniendo en cuenta el gran número de cargas sensibles conectadas a la red, debe mostrarse un mayor interés en eliminarlas [2].

## 1.2. Cálculo de sobretensiones inducidas

Se ha visto que el cálculo de sobretensiones inducidas es un aspecto fundamental para el estudio del comportamiento de las líneas aéreas frente a descargas indirectas. Además, gran parte de las líneas de distribución no se encuentran apantalladas o no es viable (económicamente) apantallarlas con cables de guarda, lo que hace que para mejorar el comportamiento y reducir considerablemente los contorneos se tenga que focalizar el estudio en reducir las sobretensiones por descargas indirectas.

En el cálculo de las sobretensiones, el número previsto de sobretensiones por descargas atmosféricas que superan cierto valor supone una indicación del comportamiento de la línea frente al rayo. De ahí surge la necesidad de conocer la sobretensión máxima por una descarga indirecta.

En el cálculo de sobretensiones inducidas y sobre todo para determinar la tasa de contorneos (*contorneos/100 km de línea y año*) pueden aparecer diferencias importantes según el método adoptado. El procedimiento habitual para poder calcular las sobretensiones inducidas se basa en los siguientes pasos:

- Definir un modelo de corriente de retorno determinando la corriente de retorno del rayo a lo largo del canal de la descarga y a lo largo del tiempo ( $i(z, t)$ , donde  $z$  es la altura y  $t$  el tiempo).
- Calcular los campos electromagnéticos producidos por la corriente de retorno a lo largo de la red.
- Cálculo de las tensiones inducidas mediante un modelo de acoplamiento entre la línea y los campos electromagnéticos calculados.

### 1.2.1. Modelos de corriente de retorno

Existen multitud de modelos para describir la corriente de retorno de forma espacial-temporal los cuales han sido clasificados según modelos de dinámica de gases o físicos, modelos electromagnéticos, modelos de parámetros distribuidos y modelos ingenieriles [8].

Los modelos ingenieriles son por su aplicabilidad los que se explican en este capítulo. Estos modelos son fácilmente calculables y se basan en establecer una relación entre la corriente de retorno  $i(z, t)$ , y la corriente de retorno medida a tierra  $i(0, t)$ .

- Modelo de línea de transmisión (TL, Transmission Line model): supone que la corriente de retorno avanza por el canal ionizado provocado por el rayo como si se comportara como una línea sin pérdidas (1.1).

$$\begin{cases} i(z, t) = i\left(0, t - \frac{z}{\nu}\right) & \text{si } z \leq \nu \cdot t \\ i(z, t) = 0 & \text{si } z > \nu \cdot t \end{cases} \quad (1.1)$$

donde

$\nu$  es la velocidad de la descarga de retorno

$z$  es la altura

- Modelo modificado de línea de transmisión (MTL, Modified Transmission Line model): es similar al TL pero la corriente sufre una atenuación a lo largo de la altura  $z$ . Esta atenuación puede ser lineal (MTLL) o exponencial (MTLE) siendo la última la más utilizada. El modelo MTLE se puede representar según (1.2).

$$\begin{cases} i(z, t) = \exp -z/\lambda \cdot i\left(0, t - \frac{z}{\nu}\right) & \text{si } z \leq \nu \cdot t \\ i(z, t) = 0 & \text{si } z > \nu \cdot t \end{cases} \quad (1.2)$$

donde

$\nu$  es la velocidad de la descarga de retorno

$\lambda$  es una constante de atenuación

$z$  es la altura

Otros modelos ingenieriles pero menos utilizados son los de Bruce Golde (BG) y el modelo de corriente viajera (TCS).

- Modelo de Bruce Golde (BG):

$$\begin{cases} i(z, t) = i(0, t) & \text{si } z \leq \nu \cdot t \\ i(z, t) = 0 & \text{si } z > \nu \cdot t \end{cases} \quad (1.3)$$

donde

$\nu$  es la velocidad de la descarga de retorno

$z$  es la altura

- Modelo de corriente viajera (TCS, Traveling Current Source):

$$\begin{cases} i(z, t) = i(0, t + \frac{z}{c}) & \text{si } z \leq \nu \cdot t \\ i(z, t) = 0 & \text{si } z > \nu \cdot t \end{cases} \quad (1.4)$$

donde

$\nu$  es la velocidad de la descarga de retorno

$c$  es la velocidad de la luz

$z$  es la altura

### 1.2.2. Cálculo del campo electromagnético

A partir de la expresión de la corriente de retorno en [9] se determinaron las expresiones para calcular los campos electromagnéticos sobre un terreno plano y perfectamente conductor (1.5), (1.6) y (1.7). En la Figura 1.1 se muestra la geometría utilizada.

$$dE_r(r, \phi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i(z', \tau - R/c) - \frac{r(z-z')}{c^2R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} \right) \quad (1.5)$$

$$dE_z(r, \phi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i(z', \tau - R/c) - \frac{r^2}{c^2R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} \right) \quad (1.6)$$

$$dB_\phi(r, \phi, z, t) = \frac{\mu_0 dz'}{4\pi} \left( \frac{r}{R^3} i(z', \tau - R/c) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} \right) \quad (1.7)$$

donde

$Z$  es la altura de la medición del campo

$Z'$  es la altura de la corriente de retorno

$R$  es la distancia entre el punto de observación y la corriente de retorno a la altura  $Z'$

$r$  es la distancia entre la base del canal de la descarga (origen de coordenadas) y el punto

de observación

$\epsilon_0$  y  $\mu_0$  son la permitividad y permeabilidad en el vacío

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío

$i(Z',t)$  es la corriente a lo largo del canal de descarga

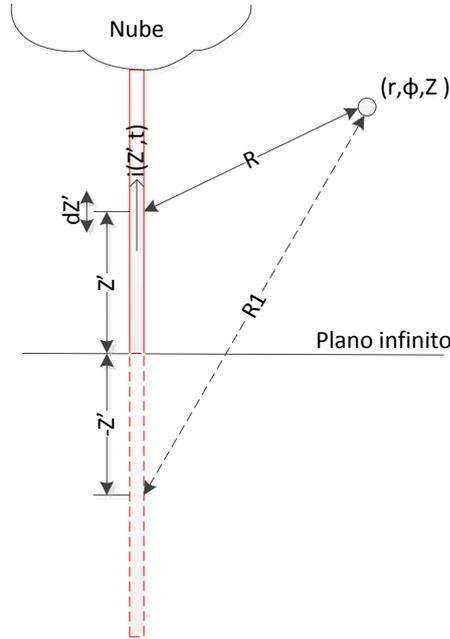


Figura 1.1: Geometría en el cálculo de campos electromagnéticos

Cuando se considera un terreno con conductividad finita, las expresiones de los campos electromagnéticos se vuelven muy complicadas de resolver incrementando considerablemente el tiempo de cómputo. Así pues, se han desarrollado algunas aproximaciones para incluir el efecto de la conductividad donde la más utilizada es la aproximación Cooray-Rubinstein (1.8) el cual considera que solo es afectado el campo eléctrico horizontal.

$$E_x^\sigma(x, y, z, t) = E_{x0}^i(x, y, z, t) - g_1(t) * B_{y0}(x, y, 0, t) \quad (1.8)$$

donde

$E_x^\sigma(x, y, z, t)$  es el campo eléctrico horizontal sobre un terreno no ideal

$E_{x0}^i(x, y, z, t)$  es el campo eléctrico horizontal sobre un terreno perfectamente conductor

$B_{y0}(x, y, 0, t)$  es el campo magnético en dirección perpendicular a la línea sobre un terreno perfectamente conductor

$g_1(t)$  se escribe en el dominio de Laplace como  $g_1(s) = \sqrt{\frac{\epsilon_0 s}{\sigma + \epsilon_r \epsilon_0 s}}$

$\sigma$  es la conductividad del terreno

$\epsilon_0$  y  $\epsilon_r$  son las permitividades en el vacío y relativa respectivamente

\* denota convolución

### 1.2.3. Modelos de acoplamiento

La interacción de los campos electromagnéticos con las líneas aéreas puede representarse mediante una línea de transmisión con fuentes distribuidas. A partir de las expresiones de

los campos electromagnéticos, se han desarrollado diferentes modelos de acoplamiento para el cómputo de sobretensiones inducidas. Los principales modelos son los de Rusck, Agrawal, Taylor y Chowdhuri.

El modelo de Rusck fue uno de los primeros en aparecer y contiene algunas limitaciones como la simplificación de que la línea eléctrica es de longitud infinita. A pesar de ello, Rusck dedujo una fórmula analítica para calcular la sobretensión máxima inducida en una línea aérea infinita sujeta a algunas restricciones que es ampliamente utilizada por su simplicidad. Pero en el cálculo en redes de distribución complejas el modelo de Rusck se ve muy limitado. Se ha determinado que el modelo de Chowdhuri no es matemáticamente correcto al no considerar una de las componentes del campo electromagnético. Los modelos de Agrawal y de Taylor son el mismo y su diferencia estriba en la forma en que se presentan las ecuaciones de transmisión de la línea. El modelo de Agrawal resulta el más aceptado y utilizado en la actualidad por lo que será el que se utilice en ese proyecto.

El modelo de Agrawal ha sido implementado para el software EMTP-ATP en [5] [10] y [11] y para el MATLAB en [12]. En [5] y [10], implementación que se le suele llamar LIV (Lightning Induced Voltage), las ecuaciones de la línea de transmisión se modifican mediante el método de las características para llegar a un modelo de línea desacoplado con fuentes de tensión. En [11], se ha implementado el LIOV code (Lightning Induced OverVoltage code) donde el cálculo de sobretensiones se realiza a partir del método de las diferencias finitas el cual utiliza las series de Taylor para representar las ecuaciones diferenciales de la línea por ecuaciones de diferencias finitas que serán resueltas de forma recursiva. Finalmente, en [12] el código implementado (YALUK-ATP) realiza una combinación del método de las características con el método de las diferencias finitas para resolver los problemas del tiempo de cómputo que presenta el LIOV. Las características de estos tres modelos [12] se resumen en la Tabla 1.1.

### 1.3. Protecciones contra descargas atmosféricas

Como se ha visto en la introducción de éste capítulo, existen principalmente dos tipos de protecciones frente al rayo. El primero es mediante la captación de descargas para derivarlas por un camino deseado. El segundo tipo de protección está relacionado con la reducción de la magnitud de las sobretensiones (principalmente mediante pararrayos).

El primer sistema de captación de descargas apareció en el año 1753 y fue llamado punta Franklin (en honor a su creador Benjamín Franklin). El pararrayos Franklin, contrariamente a lo que expresa su nombre, trata de captar la descarga para luego conducirla a un lugar que no produzca daños o que éstos sean mínimos. Este pararrayos consiste en un mástil metálico acabado en punta, multipuntas, bolas, etc. de forma que cuando hay tormenta se acumulan cargas eléctricas en estos extremos de forma que la descarga es más probable que suceda entre la nube y el pararrayos que entre la nube y tierra. Basado en el funcionamiento del pararrayos Franklin, los cables de guarda son cables tendidos a lo largo de una red aérea con el fin de captar las descargas y derivarlas a tierra. Estos cables se sitúan a lo largo de la línea y por encima de los conductores de fase y deben ir conectados a tierra. Los cables de guarda suelen instalarse en las líneas de transporte donde los aisladores son capaces de soportar las tensiones producidas en las torres cuando un rayo impacta en estos cables. La eficacia del uso de cables de guarda en redes de distribución se ve drásticamente reducida porque no es económicamente viable aumentar el nivel de aislamiento y disminuir la resistencia de puesta a tierra (aspectos fundamentales para que el cable de guarda sea eficaz).

Como sistemas de reducción de sobretensiones se utilizan los descargadores de sobretensión o también llamados pararrayos según la definición del IEC. Los pararrayos son elementos que se comportan como una impedancia no lineal cuyo objetivo es tratar de limitar las

<b>Característica</b>	<b>LIV</b>	<b>LIOV</b>	<b>YALUK</b>
Onda de la corriente en la base del canal de descarga	Cualquier forma de onda cuando la conductividad del terreno es finita. Forma triangular cuando se considera la conductividad	Cualquier forma	Cualquier forma
Descarga de retorno	TL	Cualquier modelo ingenieril	Cualquier modelo ingenieril
Resistencia transitoria del terreno	No	Sí	Sí
Efecto corona	No	Sí	Sí
Tiempo de cálculo en tanto por uno respecto el LIV	1	5-10	2-3
Aplicación	Líneas multifásicas y redes complejas con terreno perfectamente conductor. Para conductividad finita y líneas largas presenta una sobreestimación en las tensiones	Para redes complejas multifásicas y terreno con cualquier conductividad	Para redes complejas multifásicas y terreno con cualquier conductividad

Tabla 1.1: Comparación de las tres implementaciones del modelo Agrawal

sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, por operaciones de maniobra o por otras causas. En este sentido, su comportamiento se caracteriza por actuar como un aislador durante las condiciones normales de operación y como un conductor en condiciones de sobretensión. En la primera mitad del siglo XX se empezó a utilizar carburo de silicio (SiC) como elemento resistivo no lineal en los pararrayos. Estos pararrayos conducían corrientes considerables en estado estacionario, por lo que se tuvieron que añadir explosores. Sin embargo, actualmente los pararrayos más utilizados son los de óxidos de zinc (ZnO). Los pararrayos de ZnO tienen una mayor no linealidad respecto a los de carburos de silicio y, en condiciones normales de operación, las corrientes de fuga son despreciables por lo que habitualmente se instalan sin explosores. La fuerte no linealidad del pararrayos de ZnO hace que la resistencia pueda pasar de  $15\text{ M}\Omega$  en condiciones normales a  $15\ \Omega$  en la tensión con la corriente nominal de descarga. Como ventajas, presentan una mayor capacidad de limitación de sobretensión así como una mayor fiabilidad.

## Capítulo 2

# El fenómeno de la descarga atmosférica

### 2.1. Clasificación de las descargas

Las descargas atmosféricas, más conocidas como rayos, son un fenómeno de origen natural. El origen de estas descargas ha sido explicado por distintas teorías las cuales coinciden en que en las nubes de tormenta se produce un proceso de separación de cargas a partir del cual se inicia la formación del rayo.

Un rayo puede producirse entre diferentes partes de una nube, entre dos nubes distintas o entre una nube y tierra. Debido a su interés práctico, las más estudiadas son las descargas nube-tierra ya que pueden ocasionar tanto pérdidas humanas como materiales así como ser una de las principales causas de incendios en el planeta. Las descargas nube-tierra se han clasificado en cuatro categorías, como se puede ver en la Figura 2.1, dependiendo de la polaridad y de la dirección del canal. Aproximadamente el 90% de las descargas son negativas descendientes (categoría 1) y, aproximadamente el 10%, son positivas descendientes (categoría 3). Las descargas iniciadas desde tierra (categorías 2 y 4) se producen en raras ocasiones en estructuras elevadas (más de 100 m) o en los picos de las montañas.

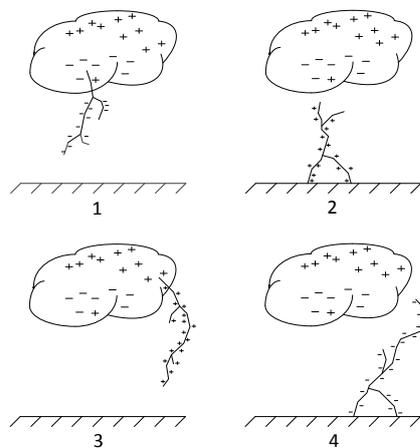


Figura 2.1: Clasificación de los rayos entre nube y tierra

En este proyecto se estudian únicamente los efectos de los rayos de categoría 1, pues son los más representativos.

## 2.2. Proceso de formación de la descarga

Las descargas atmosféricas nube-tierra tienen su origen en la separación de cargas dentro de las nubes. Aunque no existe una teoría clara sobre cómo se produce esta separación, se conoce que las nubes de tormenta tienen una estructura tripolar. En la parte superior se encuentra una región con carga positiva, en el centro hay una concentración de cargas negativas y la parte inferior, en menor medida, está dotada de cargas positivas como se muestra en la Figura 2.2.

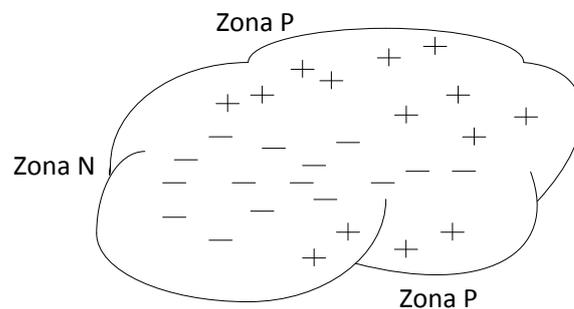


Figura 2.2: Estructura tripolar de las nubes de tormenta

Esta separación de cargas induce a la generación de un campo eléctrico que, cuando supera cierto valor, produce el encendido de la descarga. En un primer momento, se origina un proceso de ruptura dieléctrica iniciando un líder escalonado que desciende a pasos que pueden considerarse discretos. Cuando este líder está cerca de la tierra, el campo eléctrico en objetos punzantes como pararrayos, antenas, árboles y hasta irregularidades del propio terreno supera la rigidez dieléctrica del aire iniciando un líder ascendente. Cuando los dos líderes se encuentran, se forma un canal nube-tierra ionizado y se produce lo que se conoce como primera descarga de retorno con una velocidad de aproximadamente un tercio de la velocidad de la luz y una duración de unos 100 microsegundos.

Si el proceso termina con la primera descarga de retorno, se tiene un rayo de descarga simple. Pero es habitual que surjan sucesivas descargas generando rayos de descargas múltiples.

En [13] hay una extensa explicación sobre la formación del rayo que se ha intentado resumir en éste capítulo.

## Capítulo 3

# Caracterización del rayo

### 3.1. Forma de la onda de corriente

La caída de un rayo en las redes eléctricas y sus proximidades genera sobretensiones transitorias pudiendo provocar faltas o daños tanto en los aisladores como en los equipos conectados. Es de especial interés pues, predecir estas sobretensiones. Para el cálculo de estas sobretensiones un rayo se puede caracterizar por una fuente de corriente. Sin embargo, no todos los rayos son iguales. Las magnitudes y características de esta fuente de corriente siguen distribuciones estadísticas y dependen de la polaridad del rayo.

La Figura 3.1 muestra la forma típica de un rayo de categoría 1 [1]. Esta onda está caracterizada por un rápido ascenso hacia un primer valor de pico. Posteriormente se produce un segundo pico para acabar descendiendo lentamente.  $T_{10/90}$  representa el tiempo transcurrido entre que la onda pasa del 10 % al 90 % del primer valor de pico y  $T_{30/90}$  el tiempo entre el 30 % y el 90 % del primer valor de pico.

Sin embargo, la representación analítica de esta onda de corriente puede resultar muy compleja. Por esta razón, y desde el punto de vista ingenieril, es habitual representarla con una onda en doble rampa caracterizada por el tiempo de subida  $T_c$ , la corriente de cresta  $I_c$  y el tiempo de cola  $T_h$  definido como el instante en que la corriente toma un valor de  $0,5 \cdot I_c$ . La expresión analítica de esta onda se muestra en la ecuación (3.1) y se puede visualizar en la Figura 3.2.

En este proyecto se utiliza la representación de la corriente del rayo mediante una fuente de corriente en doble rampa.

$$\begin{cases} i(t) = \frac{I_c}{T_c} \cdot t \cdot u(t) + I_c \cdot (T_c - t) \cdot \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{2 \cdot (T_c - T_h)} \right) \cdot u(t - T_c) & \text{si } t \leq 2 \cdot T_h - T_c \\ i(t) = 0 & \text{si } t > 2 \cdot T_h - T_c \end{cases} \quad (3.1)$$

donde

$t$  es el tiempo expresado en segundos

$T_c$  es el tiempo de subida o de cresta expresado en segundos

$T_h$  es el tiempo de cola expresado en segundos

$I_c$  es la corriente de cresta expresada en Amperes

$u(t), u(t - T_c)$  son funciones escalón unitario

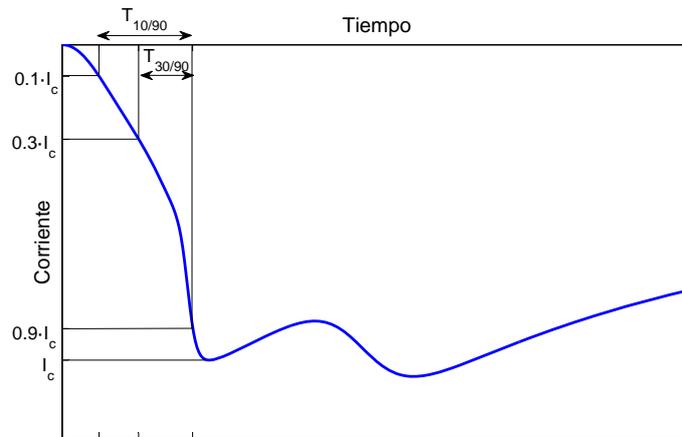


Figura 3.1: Forma de onda de la corriente de un rayo de categoría 1

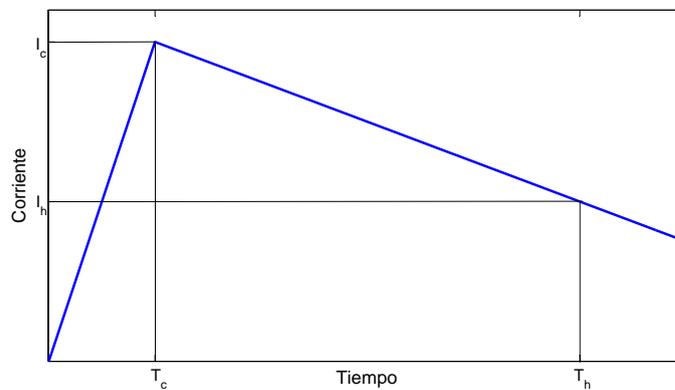


Figura 3.2: Onda de corriente del rayo en doble rampa

### 3.2. Parámetros representativos del rayo

Desde el punto de vista del análisis de sobretensiones, y teniendo en cuenta la representación del rayo mediante una fuente de corriente en doble rampa, los parámetros más representativos son la corriente de cresta,  $I_c$ , el tiempo de cresta  $T_c$ , el tiempo de cola  $T_h$  y la velocidad de retorno  $\nu$ . Sin embargo, en una visión más global, la localización geográfica del impacto así como la previsión del número de rayos que van a tener afecto sobre línea aérea son aspectos fundamentales a tener en cuenta.

Las características de la onda de corriente son de naturaleza aleatoria y sus distribuciones estadísticas han sido identificadas como normal-logarítmicas (log-normal). La función de densidad de probabilidad log-normal viene definida según la expresión (3.2). También cabe destacar que se ha observado que existe una correlación entre el tiempo de cresta y la corriente de cresta cuyo factor de correlación es de  $\rho = 0,47$ . De acuerdo con [14], el tiempo de cola no tiene una influencia significativa en las tensiones soportadas por los aisladores por lo que se ha optado por asignar un valor constante a este parámetro de  $50 \mu s$ . Por otro lado, la velocidad de retorno del rayo se expresará en este documento mediante una distribución uniforme entre  $2,9 \cdot 10^7$  m/s y  $2,4 \cdot 10^8$  m/s.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot x \cdot \sigma_{\ln x}} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln x - \ln \bar{x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right)} \quad (3.2)$$

donde

$\sigma_{\ln x}$  es la desviación estándar de  $\ln x$

$\bar{x}$  es el valor medio de  $x$

$x$  es una variable aleatoria que sigue una distribución normal logarítmica

La probabilidad que  $x$  se encuentre entre dos valores  $a$  y  $b$  se determina integrando la función densidad de probabilidad, ecuación (3.3).

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3.3)$$

La Tabla 3.1 muestra los valores adoptados para las distribuciones de  $I_c$  y  $T_c$ .

Parámetro	$\bar{x}$	$\sigma_{\ln x}$
$I_c$	31,1 kA	0,484
$T_c$	3,83 $\mu$ s	0,55

Tabla 3.1: Distribuciones log-normal adoptadas

### 3.2.1. Punto de impacto de la descarga. Modelo electrogeométrico

Determinar el punto de impacto de la descarga es fundamental para evaluar las sobretensiones en una red aérea de distribución.

Aunque la densidad de descargas (*descargas/km<sup>2</sup> y año*) sobre la superficie terrestre no es uniforme y por consiguiente la probabilidad tampoco, en áreas suficientemente pequeñas (como es el caso de las redes de distribución) puede considerarse constante. Por esta razón la localización del canal de la descarga se considera según una ley uniforme a lo largo de la región de estudio.

Una vez conocida la ubicación del rayo (más concretamente del canal del rayo), para determinar si éste cae a tierra o bien sobre la línea de la red de distribución se utiliza el modelo electrogeométrico. El objetivo de este modelo es determinar el punto final de impacto teniendo en cuenta la corriente de cresta y las coordenadas del canal de descarga bajo la hipótesis de que éste es vertical. Este modelo se basa en que al aproximarse el líder escalonado hacia tierra, en el momento en que se encuentra a una distancia  $r$  (distancia de ruptura), este puede impactar en un conductor de la línea, a tierra o a cualquier otro objeto. La distancia de ruptura  $r$  es distinta a un conductor que a tierra y, por otro lado, depende de la carga del líder y por lo tanto de la corriente de retorno. Así pues, se definen dos distancias de ruptura (ecuaciones (3.4) y (3.5)): la distancia de ruptura a un conductor  $r_c$  y la distancia de ruptura a tierra  $r_g$  en función de la corriente de cresta de la descarga.

$$r_c = A \cdot I_c^b \quad (3.4)$$

$$r_g = A \cdot I_c^b \quad (3.5)$$

La Tabla 3.2 muestra algunos de los diferentes valores de las constantes  $A$  y  $b$  propuestas en la literatura.

A partir de  $r_c$  y  $r_g$  se puede determinar, según la expresión (3.6), la distancia  $y_{min}$ . Cuando la distancia entre el canal de la descarga y la línea es inferior a  $y_{min}$  se produce un impacto directo, en caso contrario, el impacto es indirecto. Este modelo, aplicado a una línea monofásica sin apantallar, se puede visualizar en la Figura 3.3.

$$y_{min} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \quad (3.6)$$

Modelo electrogeométrico	$r_c$		$r_g$	
	A	b	A	b
Wagner	14,2	0,32	14,2	0,32
Brown	6,4	0,75	7,1	0,75
IEEEstd1410-2004	10	0,65	9	0,65
Love	10	0,65	8	0,65
Whitehead-Armstrong	6,7	0,8	6	0,8
Suzuky	3,3	0,78	3,3	0,78

Tabla 3.2: Constantes de la distancia de ruptura

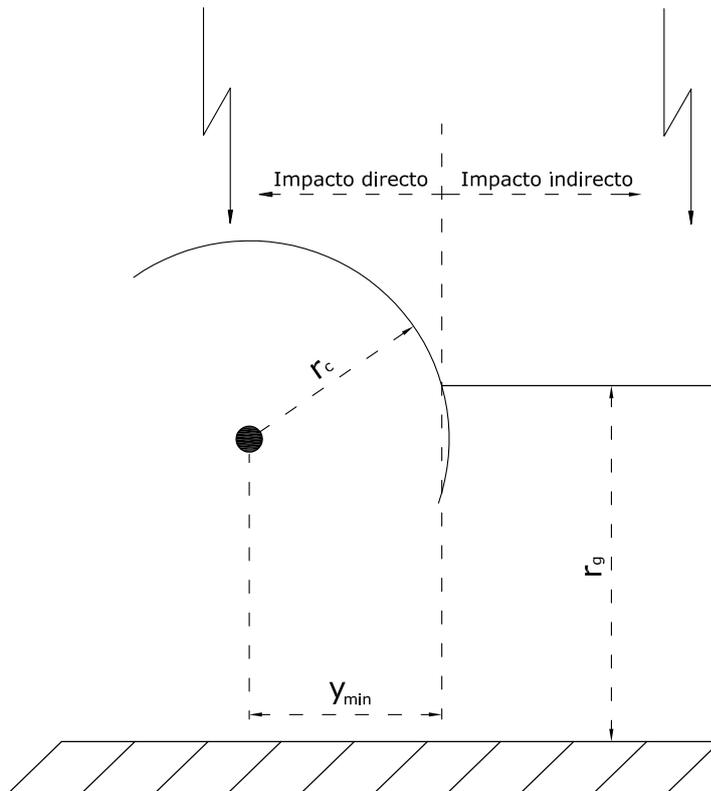


Figura 3.3: Representación gráfica del modelo electrogeométrico para una línea monofásica sin apantallar

### 3.2.2. Predicción de la densidad de descargas

Para evaluar el comportamiento de una red frente al rayo, es necesario predecir el número de descargas que van a modificar el funcionamiento normal de ésta ya que el objetivo final es valorar si es necesario realizar alguna actuación preventiva. La densidad de descargas  $N_g$  puede variar mucho de un año para otro por lo que se puede tardar muchos años en obtener un valor medio fiable. Un método alternativo para el cálculo de la densidad de descargas es mediante el número de días de tormenta al año  $T_d$  o a partir del número de horas de tormenta al año  $T_h$ . Ambos valores son conocidos como el número cerámico. Las expresiones (3.7) o (3.8) dan una aproximación de  $N_g$ . [2], [4],[1].

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (3.7)$$

$$N_g = 0,054 \cdot T_h^{1,1} \quad (3.8)$$

donde

$N_g$  es la densidad de descargas (*descargas/km<sup>2</sup>/año*)

$T_d$  es el número de días de tormenta al año

$T_h$  es el número de horas de tormenta al año

Tanto  $T_d$  como  $T_h$  se definen como el nivel cerámico de una zona



## Capítulo 4

# Cálculo de sobretensiones

El cálculo de sobretensiones se realiza con el fin de determinar el número de contorneos en una red aérea de distribución. En éste sentido, el interés está en determinar la sobretensión máxima en los aisladores cuando la red sea afectada por un rayo.

El cálculo de sobretensiones se realiza tanto por descargas directas como indirectas. Por otro lado, debido a que una gran parte de las redes aéreas de distribución no se encuentran apantalladas y los contorneos por descargas directas son difíciles de evitar, en apartados posteriores únicamente se valorarán las descargas indirectas.

### 4.1. Sobretensiones por descargas directas

Un rayo puede impactar en un conductor de fase cuando la línea no se encuentra apantallada o bien el apantallamiento es deficiente. En este caso se producen dos ondas de sobretensión que viajan en sentido contrario como se muestra en la Figura 4.1. La sobretensión máxima en este caso dependerá de la corriente de cresta  $I_c$  y de la impedancia característica de la línea  $Z_c$  según la expresión (4.1). La impedancia característica suele estar alrededor de los  $400 \Omega$  y, integrando la expresión (3.3) entre 10 kA y 200 kA, se observa que la probabilidad que la corriente de cresta sea mayor a 10 kA es del 99%. Substituyendo estos valores en (4.1), se deduce que un 99% de las descargas directas producirán una sobretensión máxima que superará los 2 MV. Debido que el nivel básico de aislamiento (BIL) de las redes de distribución es muy inferior, se puede asumir que toda descarga directa provocará un contorneo.

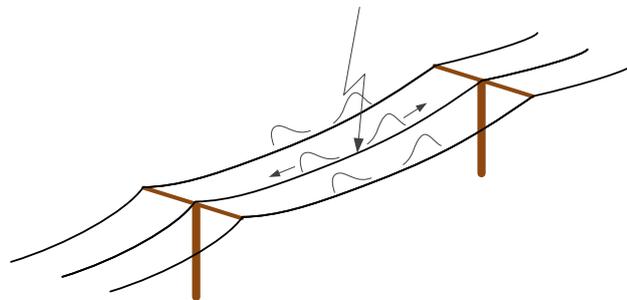


Figura 4.1: Impacto directo de un rayo

$$V_{max} = \frac{1}{2} \cdot Z_c \cdot I_c \quad (4.1)$$

## 4.2. Sobretensiones por descargas indirectas

Cuando un rayo impacta a tierra en las cercanías de una red aérea, se generan sobretensiones inducidas. Estas sobretensiones suelen ser menos severas que las producidas por impactos directos, pero más habituales. Mientras que las redes de transporte suelen tener un nivel de aislamiento suficientemente elevado para evitar el contorneo de los aisladores, en las redes de distribución pueden producirse contorneos por lo que se hace necesario tener en cuenta este fenómeno.

Para el cómputo de estas sobretensiones primeramente hay que modelar la corriente de retorno a lo largo del canal de la descarga para tener la corriente en función del tiempo  $t$  y de la altura del canal  $z$ . Una vez conocida esta corriente, se pueden calcular los campos electromagnéticos a lo largo de la línea. Finalmente, a partir de los campos electromagnéticos, mediante un modelo de acoplamiento, se calculan las sobretensiones inducidas por la descarga. Este proceso está esquematizado en la Figura 4.2.

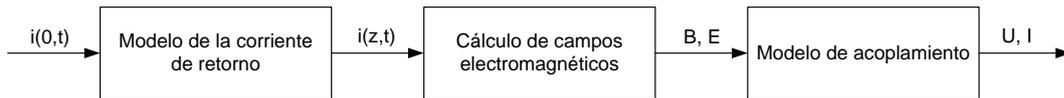


Figura 4.2: Procedimiento para el cálculo de sobretensiones inducidas por descargas indirectas

### 4.2.1. Cálculo simplificado. Fórmula de Rusck

Uno de los primeros modelos ampliamente utilizados para el cálculo de sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas fue desarrollado por Rusck llegando a una fórmula analítica, ecuación (4.2), para predecir la sobretensión máxima en una línea aérea. Las hipótesis asumidas en esta formulación son que la línea aérea es de longitud infinita e ideal sobre un terreno perfectamente conductor, la corriente de retorno se representa como una función escalón y el modelo de propagación de la corriente a lo largo del canal del rayo (vertical) es el  $TL$ .

$$V_{imax} = Z_0 \cdot \left( 1 + \frac{\nu/c}{\sqrt{2 - (\nu/c)^2}} \right) \cdot \frac{h \cdot I_c}{d} \quad (4.2)$$

donde

$$Z_0 = (1/4\pi) \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 30 \Omega$$

$I_c$  es la corriente de cresta

$h$  es la altura de la línea

$d$  es la distancia perpendicular entre la línea y el punto de impacto

$c$  es la velocidad de la luz

$\nu$  es la velocidad de retorno del rayo

Esta ecuación puede tener errores significativos, pero asumiendo que la previsión de la cantidad de descargas así como sus características también pueden contener errores, puede

aceptarse en ciertas ocasiones. Por otro lado, el uso de esta ecuación presenta limitaciones cuando se aplica en una red ramificada y con equipos conectados. En este caso, se requiere un método computacional más complejo.

#### 4.2.2. Cálculo de sobretensiones inducidas. Método de Agrawal

Para el cálculo de sobretensiones inducidas según el modelo de Agrawal hay que modelizar la corriente del rayo a lo largo del canal de la descarga así como calcular los campos electromagnéticos a lo largo de la línea.

Con los campos electromagnéticos conocidos, un tramo de línea puede representarse por las dos ecuaciones introducidas por Agrawal, Price y Gurbaxani (4.3) y (4.4) bajo la hipótesis de que la línea es ideal.

$$\frac{\partial u^s(x, t)}{\partial x} + L' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = E_x^i(x, h, t) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + C' \cdot \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (4.4)$$

donde

$E_x^i(x, h, t)$  es la componente horizontal del campo eléctrico incidente a lo largo del eje  $x$  a la altura  $h$

$h$  es la altura del conductor

$L'$  y  $C'$  son la inductancia y capacidad de la línea

$i(x, t)$  es la corriente en la línea

$u^s(x, t)$  es la llamada tensión dispersa expresada según  $u^s(x, t) = -\int_0^h E_z^s(x, z, t) dz$  siendo  $E_z^s(x, z, t)$  la componente vertical del campo eléctrico disperso

La tensión total inducida en la línea se puede expresar como la suma de la tensión dispersa y la tensión incidente (4.5).

$$u(x, t) = u^s(x, t) + u^i(x, t) \quad (4.5)$$

siendo  $u^i(x, t) = -\int_0^h E_z^i(x, z, t) dz \approx -h \cdot E_z^i(x, 0, t)$

Finalmente, las condiciones de contorno de la tensión dispersa se expresan como (4.6) y (4.7).

$$u^s(x_b, t) = -R_b \cdot i(x_b, t) - u^i(x_b, t) \quad (4.6)$$

$$u^s(x_a, t) = R_a \cdot i(x_a, t) - u^i(x_a, t) \quad (4.7)$$

Estas ecuaciones pueden ser representadas por su circuito equivalente. La Figura 4.3 muestra la disposición de la línea así como la representación del circuito eléctrico del modelo de acoplamiento de Agrawal.

Este modelo ha sido implementado en el EMTP-ATP [5] asumiendo el modelo TL para la corriente de retorno y utilizando la metodología de Rusck para el cálculo de los campos electromagnéticos (considerando una corriente en forma de escalón y un terreno perfectamente conductor). Con ello se llega a expresiones completamente analíticas lo que permite

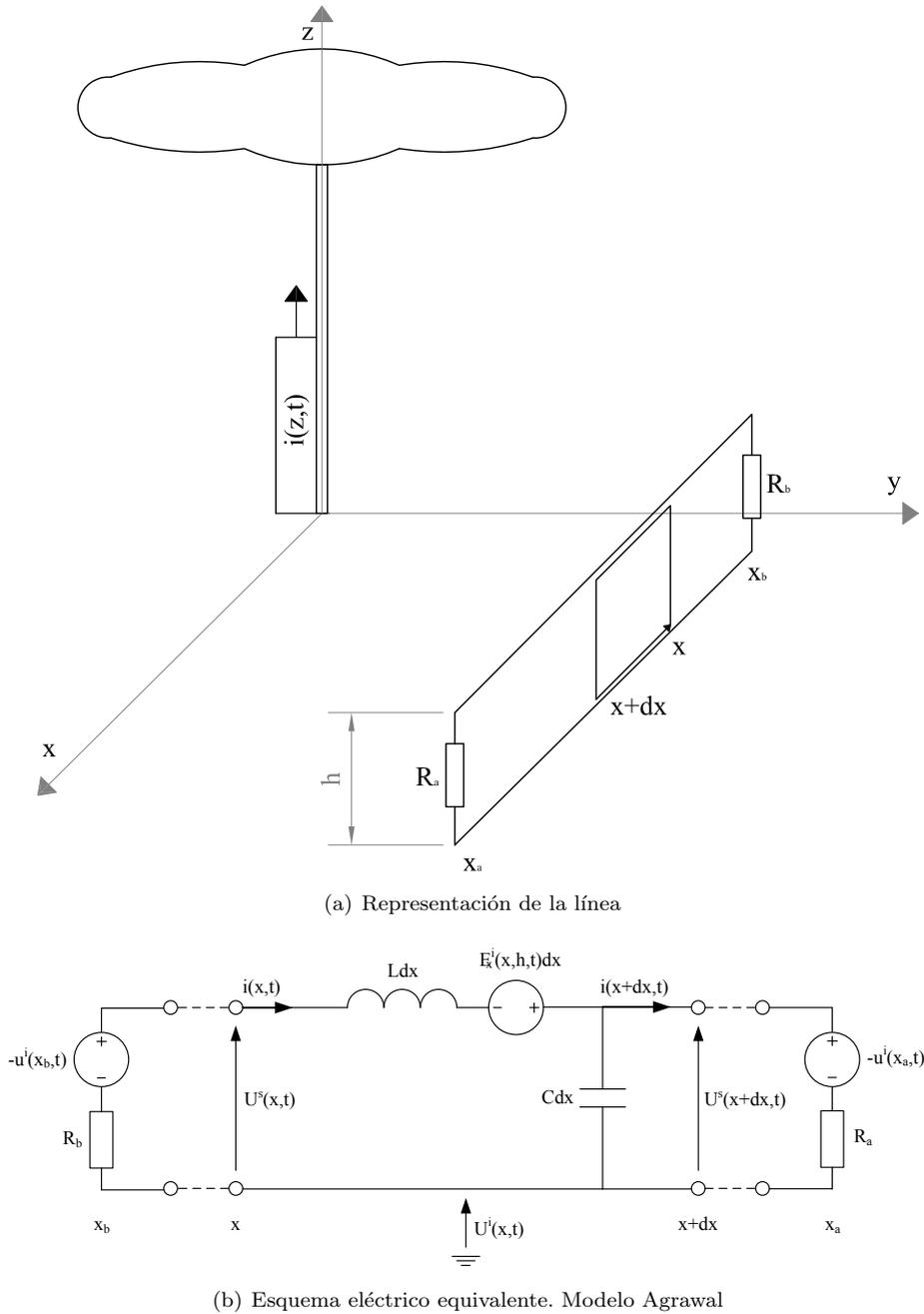


Figura 4.3: Representación de la línea y su esquema equivalente según el modelo de Agrawal

un cómputo más rápido. Para obtener la respuesta para cualquier forma de onda, se realiza una convolución según (4.8) donde  $g_0(t)$  es la respuesta a una corriente  $I_0$  en forma de escalón y  $g(t)$  es la respuesta a una corriente variante en el tiempo  $i(t)$ .

$$g(t) = \int_0^t \frac{g_0(t - \tau)}{I_0} \cdot \frac{\partial i(\tau)}{\partial t} d\tau \tag{4.8}$$

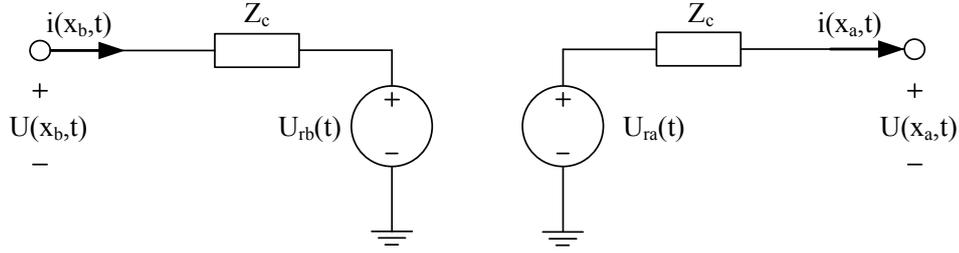


Figura 4.4: Esquema equivalente del modelo implementado en el EMTP-ATP para el cómputo de sobretensiones inducidas por descargas indirectas

Donde  $U(x_a, t)$  y  $U(x_b, t)$  son la suma de  $U^s$  y  $U^i$  en los respectivos puntos de la línea. Las fuentes  $U_{ra}$  y  $U_{rb}$  son controladas, en cada paso de integración, desde el lenguaje MODELS según las ecuaciones desarrolladas en el Apéndice C,  $Z_c$  es la impedancia característica de la línea y las condiciones de contorno serán calculadas por el EMTP-ATP. El paso de integración requerido será de  $0,1 \mu s$  como se detalla en el Apéndice D.

Cuando se tiene en cuenta la conductividad del terreno, el campo eléctrico horizontal,  $E_x^\sigma(x, y, z, t)$ , se calcula según la aproximación de Cooray-Rubinstein como la suma del campo eléctrico sobre un terreno ideal y la contribución de la impedancia del terreno según la expresión (4.9).

$$E_x^\sigma(x, y, z, t) = E_{x0}^i(x, y, z, t) - g_1(t) * B_{y0}(x, y, 0, t) \quad (4.9)$$

donde

$E_x^\sigma(x, y, z, t)$  es el campo eléctrico horizontal sobre un terreno no ideal

$E_{x0}^i(x, y, z, t)$  es el campo eléctrico horizontal sobre un terreno perfectamente conductor

$B_{y0}(x, y, 0, t)$  es el campo magnético en dirección perpendicular a la línea sobre un terreno perfectamente conductor

$g_1(t)$  se escribe en el dominio de Laplace como  $g_1(s) = \sqrt{\frac{\varepsilon_o s}{\sigma + \varepsilon_r \varepsilon_o s}}$

$\sigma$  es la conductividad del terreno

$\varepsilon_o$  y  $\varepsilon_r$  son la permitividad en el vacío y la permitividad relativa respectivamente

\* denota convolución



## Capítulo 5

# Metodología para evaluar la tasa de contorneos por descargas indirectas

Como se ha visto en el capítulo 1, con la caída de un rayo aparece un riesgo de contorneo en los aisladores produciendo un cortocircuito. Las consecuencias pueden llegar desde el funcionamiento de las protecciones en el mejor de los casos hasta la destrucción de los materiales e interrupción del servicio en el caso más desfavorable. De esta manera, evaluar la tasa de contorneos en una línea aérea puede resultar muy útil para plantear la necesidad de protegerse frente al rayo.

Dada la naturaleza aleatoria del rayo, el estudio sobre la tasa de contorneos se realiza de forma estadística mediante el método de Monte Carlo donde no se tiene en cuenta la tensión de la línea a frecuencia industrial ya que podría requerir un número muy elevado de simulaciones.

El criterio para predecir si un rayo va a provocar un contorneo está basado en la comparación de la sobretensión máxima en la línea con el CFO (Critical FlashOver voltage) definido como la tensión con la que hay un 50 % de probabilidad de producirse un contorneo.

El estudio se realiza para una línea aérea de distribución rectilínea de longitud infinita considerando un solo conductor y sin cable de guarda. La altura es de 10 m y los vanos de 75 m donde la impedancia característica se calcula según la expresión (5.1) [2]. La densidad de descargas,  $N_g$ , se ha fijado en 1 *descarga/km<sup>2</sup> y año*.

Finalmente se analiza la importancia de tener en cuenta las ramificaciones a lo largo de la línea.

$$Z_c = 60 \cdot \ln \frac{2000 \cdot h}{r} \quad (5.1)$$

donde

$h$  es la altura de la línea en metros

$r$  es el radio del conductor en milímetros ( $r = 10$  mm)

## 5.1. Tasa de contorneos para una línea aérea de distribución rectilínea y de longitud infinita

En esta sección se calcula la tasa de contorneos en función del CFO y según la conductividad del terreno. Cuando la conductividad es infinita, el cálculo de sobretensiones se realiza tanto con la fórmula de Rusck como mediante el EMTP-ATP utilizando el modelo de línea presentado en el capítulo 4. Cuando la conductividad es finita, el cálculo de sobretensiones se realiza mediante el EMTP-ATP.

### 5.1.1. Tasa de contorneos para una línea sobre un terreno perfectamente conductor

#### Tasa de contorneos a partir de la fórmula de Rusck

El cálculo de la tasa de contorneos se realiza mediante un proceso iterativo según el método de Monte Carlo.

Primeramente se genera un rayo, es decir, se determinan las variables aleatorias que definen al rayo según las distribuciones presentadas en el capítulo 3. En este caso, la coordenada  $x$  se fija en el punto medio de la línea ya que, por la simetría del caso (línea infinita) únicamente es necesario tener en cuenta la distancia perpendicular a la línea. La coordenada  $y$  se limita a 500 m de la línea, es decir, se genera según una ley uniforme entre  $\pm 500$  m ya que se asume que un rayo a más de 500 m no producirá ningún contorneo. La limitación de 500 m se puede justificar a partir de la expresión simplificada de Rusck (4.2) teniendo en cuenta que la probabilidad que la corriente sea inferior a 90 kA es superior al 98 %. Calculando la tensión inducida según Rusck, con una corriente de 90 kA a una distancia perpendicular de 500 m y con una velocidad de retorno de  $2,4 \cdot 10^8$  m/s se obtiene una sobretensión aproximada de 90 kV la cual no producirá contorneo en líneas cuyo CFO sea superior a 60 kV (asumiendo que se produce un contorneo si la sobretensión máxima es mayor a  $1,5 \cdot \text{CFO}$ ). En el estudio de la tasa de contorneos en función del CFO se pone como límite inferior un CFO de 50 kV asumiendo que puede haber un pequeño error.

Una vez se ha generado el rayo, se aplica el modelo electrogeométrico, en este caso se ha utilizado el modelo IEEEStd1410-2004 de la Tabla 3.2. Si se trata de un rayo directo se vuelve a generar el evento aleatorio (incrementando el contador de rayos generados). Cuando el rayo es indirecto, se calcula la sobretensión máxima inducida según la expresión (4.2). Si la sobretensión máxima es superior a  $1,5 \cdot \text{CFO}$  se considera que la descarga provoca un contorneo [2] donde el término 1,5 representa una corrección. Finalmente se actualiza el número de contorneos y se vuelve a generar una descarga aleatoria.

La tasa de contorneos se calcula según la expresión (5.2). A partir de la generación de unos 25000 rayos la tasa se estabiliza (Figura 5.1). Dado que el cómputo de la sobretensión máxima en la línea mediante la fórmula de Rusck es sencillo, es posible fijar un número de eventos muy elevado sin resultar un problema en el tiempo de cálculo. Por esta razón se ha establecido que el proceso termine cuando se han generado 100000 rayos.

$$TC = \frac{N}{N_{tot}} \cdot N_g \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot 100 \quad (5.2)$$

donde

$TC$  es la tasa de contorneos expresada en *contorneos/100 km de línea/año*

$N$  es el número de rayos indirectos que han producido un contorneo

$N_{tot}$  es el número total de rayos generados

$N_g$  es la densidad de descargas expresada en *descargas/km<sup>2</sup>/año*

$y_{max}$  y  $y_{min}$  son los valores máximo y mínimo que puede adquirir la coordenada  $y$  en km  
100 es para escalar la tasa de contorneos cada 100 km de línea

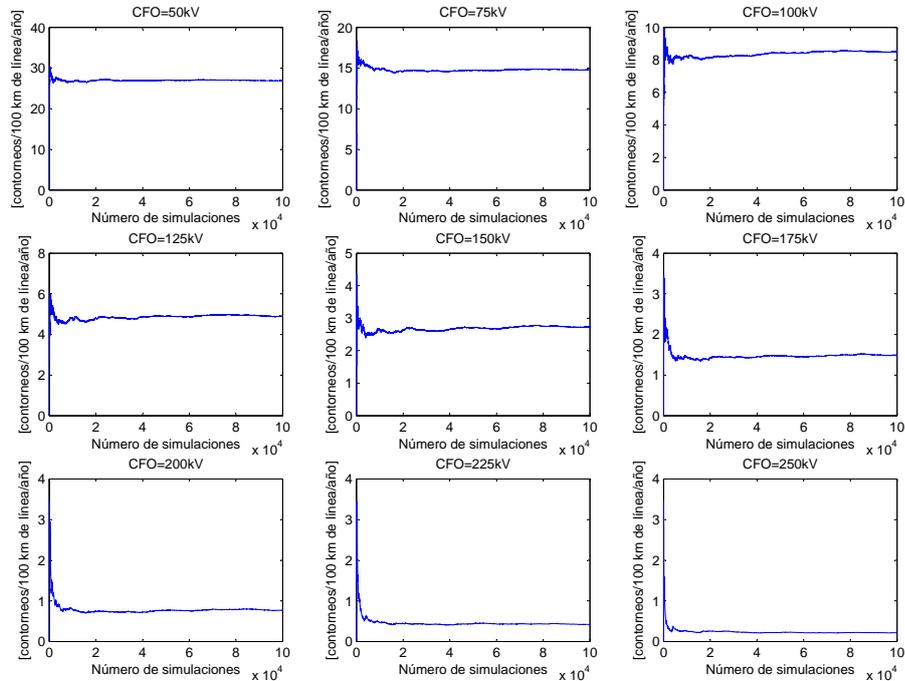


Figura 5.1: Tasa de contorneos según el número de simulaciones y el CFO

El esquema del proceso, el cual ha sido implementado en el software MATLAB puede verse en la Figura 5.2.

### Tasa de contorneos mediante el EMTP-ATP

El cálculo de la tasa de contorneos mediante simulación con el EMTP-ATP se realiza de forma similar al caso anterior.

Primeramente se modela la red mediante el EMTP-ATP utilizando el modelo de línea presentado en el capítulo 4. Este software dispone de una herramienta auxiliar llamada ATPdraw la cual permite crear un circuito eléctrico de forma gráfica y posteriormente generar el fichero con extensión .ATP el cual contiene toda la información para realizar una simulación. Puesto que resulta imposible modelar una línea infinita, se representa una línea de 2,025 km con vanos de 75 m y una impedancia característica (calculada según la expresión 5.1) en los extremos para evitar reflexiones.

Mediante el MATLAB, se lee el fichero .ATP, se genera un rayo aleatorio y se aplica el modelo electrogeométrico para determinar si se trata de una descarga directa o indirecta. Este proceso se repite hasta lograr generar un rayo indirecto (siempre actualizando el número de rayos generados). Una vez generado un rayo indirecto, se modifica el fichero .ATP actualizando las características de la descarga atmosférica y se realiza la simulación de la red mediante el EMTP-ATP. El resultado de la simulación queda guardado en un fichero con extensión .pl4 el cual se transforma al formato .MAT con la herramienta PL42MAT.

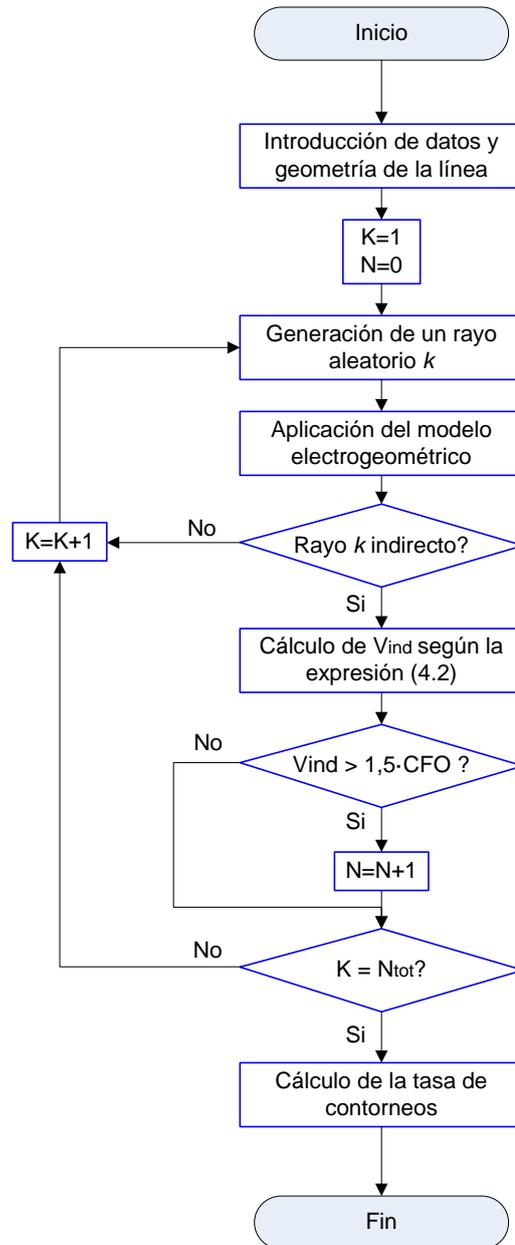


Figura 5.2: Algoritmo para el cálculo de la tasa de contorneos para una línea aérea de longitud infinita sobre un terreno perfectamente conductor. Cálculo de sobretensiones mediante la ecuación de Rusck

Analizando los resultados, si la sobretensión máxima en la red supera 1,5 veces el CFO se produce un contorneo, se actualiza el número de contorneos y se vuelve a generar un rayo aleatorio. Si el rayo no produce contorneo, se vuelve a generar un rayo aleatorio. En este caso debido que el tiempo de cómputo puede resultar muy elevado, el proceso termina cuando se han simulado 10000 rayos. Finalmente, la tasa de contorneos se calcula según la expresión (5.2).

La Figura 5.3 muestra esquemáticamente la metodología descrita.

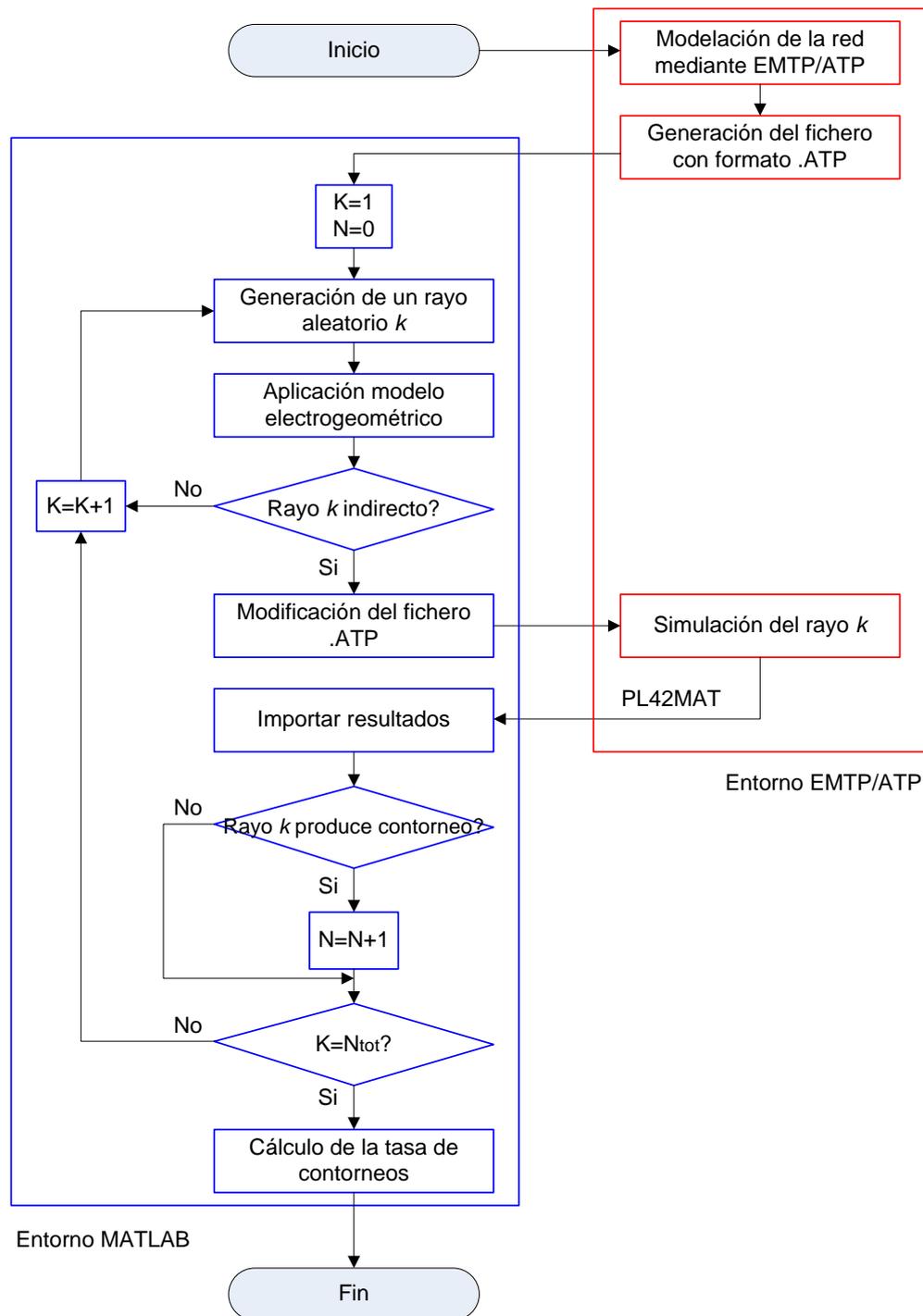


Figura 5.3: Algoritmo para el cálculo de la tasa de contorneos para una línea aérea de longitud infinita sobre un terreno perfectamente conductor. Cálculo de sobretensiones mediante el programa EMTP-ATP

## Resultados

La Figura 5.4 muestra las tasas de contorneos calculadas a partir de la simplificación de Rusck y a partir del EMTP-ATP así como los resultados obtenidos en la norma [2] y la versión anterior a la misma correspondiente al año 2004.

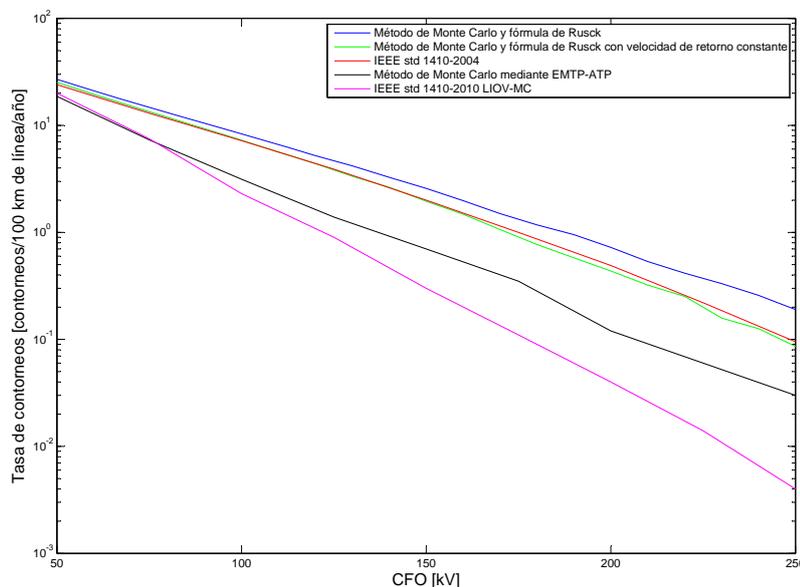


Figura 5.4: Tasas de contorneo en una línea aérea infinita sobre un terreno perfectamente conductor. En azul según Rusck y ley uniforme para la velocidad de retorno, en verde según Rusck y velocidad de retorno =  $1,2 \cdot 10^8$  m/s, en rojo según la norma IEEE std 1410-2004 (fórmula de Rusck con velocidad de retorno constante de  $1,2 \cdot 10^8$  m/s), en negro mediante EMTP-ATP y en morado según la norma IEEE std 1410-2010

En la Figura 5.4 se observa que apenas hay diferencia entre las curvas verde y roja lo que significa que la metodología para el cálculo de la tasa de contorneos con la fórmula de Rusck se ha implementado correctamente. La curva azul muestra la importancia de tener en cuenta la distribución de probabilidad de la velocidad de retorno al presentar cierta diferencia con los casos anteriores. Por otro lado, la curva morada muestra el resultado según la norma IEEEstd.1410-2010 [2] la cual utiliza el modelo de Agrawal para el cálculo de sobretensiones implementado en el código LIOV (Lightning Induced OverVoltages) [11] mientras que la curva negra muestra el resultado obtenido mediante el EMTP-ATP con el modelo Agrawal según el capítulo 4. Para un CFO de hasta 100 kV los resultados son muy parecidos mientras que para CFO más elevados el cálculo mediante el EMTP-ATP da resultados inferiores. Esto se debe, probablemente, a que en el cómputo mediante el EMTP-ATP únicamente se han realizado 10000 casos y para niveles elevados de CFO el método de Monte Carlo todavía no ha convergido como muestra la Figura 5.5. También se puede ver que existen diferencias importantes cuando las sobretensiones se calculan mediante la expresión simplificada de Rusck o mediante métodos más sofisticados. En el primer caso (Rusck), la corriente del rayo se representa mediante un escalón mientras que en el modelo utilizado en el EMTP-ATP es representada mediante una doble rampa. Para comparar la importancia de la forma de la onda de corriente se ha realizado una simulación mediante el modelo de EMTP-ATP con un tiempo de frente de la onda de corriente fijado en  $1 \mu\text{s}$  para asemejarse más a un escalón. El resultado se muestra en la Figura 5.6 en la que se observa que el resultado mediante las dos metodologías es aproximadamente el mismo.

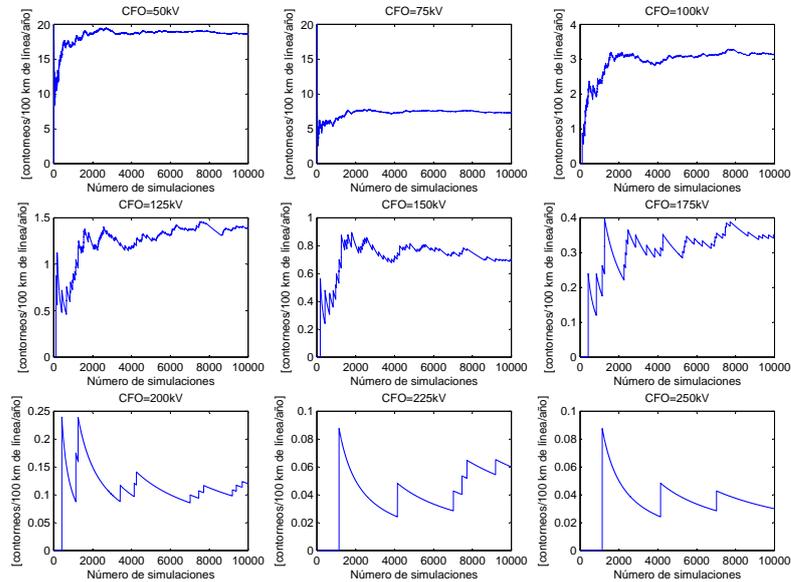


Figura 5.5: Tasas de contorneo según el número de simulaciones y el CFO

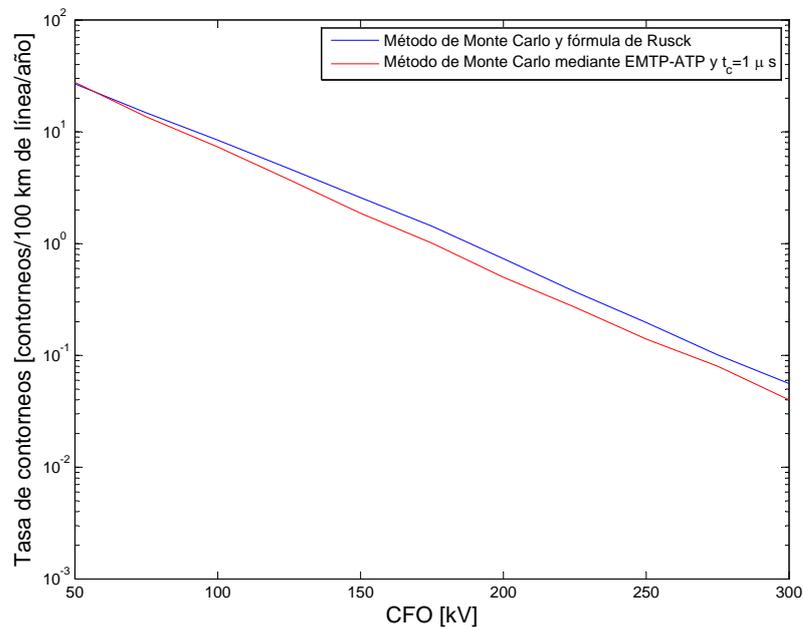


Figura 5.6: Comparación de la tasa de contorneos mediante la fórmula de Rusck (corriente en escalón) y mediante el modelo de Agrawal (corriente en doble rampa y  $t_c = 1 \mu s$ )

Se concluye pues, que el cálculo de sobretensiones inducidas mediante la metodología de Rusck presenta un error debido que la corriente del rayo se considera en forma de escalón por lo que, a pesar de ser ampliamente utilizada en la literatura y requerir un tiempo de cómputo muy reducido, resulta menos preciso para estudios detallados. Por otro lado,

la metodología utilizada mediante el EMTP-ATP puede dar buenos resultados cuando el número de simulaciones resulta suficientemente grande y, aunque el tiempo de cómputo en este caso resulta mucho mayor, se considera más adecuada esta segunda metodología.

### 5.1.2. Tasa de contorneos según la conductividad del terreno para una línea aérea de distribución infinita

Cuando se considera la conductividad del terreno, El cálculo de sobretensiones se realiza mediante el EMTP-ATP donde en el modelo de línea se le añade el efecto de la conductividad. La metodología utilizada es la misma que en el caso anterior según la Figura 5.3 y las conductividades utilizadas son 1 mS/m, 10 mS/m y  $\infty$ . El resultado se muestra en la Figura 5.7.

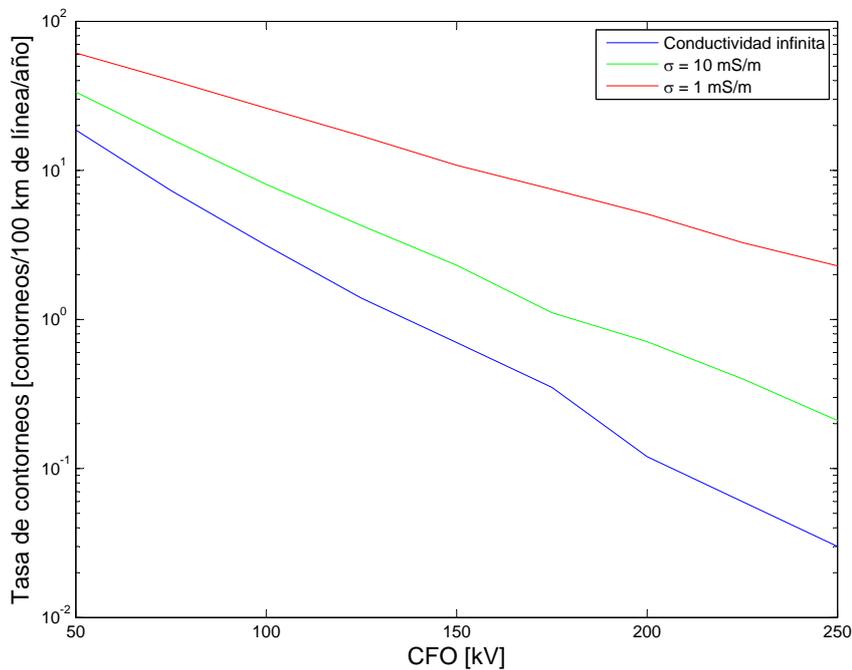


Figura 5.7: Tasa de contorneos según la conductividad del terreno y el CFO

Como puede observarse, existen diferencias considerables cuando se tiene en cuenta la conductividad del terreno. De esta manera, cuando la conductividad del terreno es suficientemente baja, ésta debe tomarse en consideración.

Otro aspecto que se observa es que la tasa de contorneos disminuye rápidamente al aumentar el CFO. Para redes de distribución con bajo nivel de aislamiento la cantidad prevista de contorneos puede ser importante (para un CFO de 100 kV se prevén entre 3 y 30 *contorneos/100 km de línea y año*) siendo el peor caso cuando el terreno es mal conductor.

## 5.2. Influencia de las ramificaciones y terminaciones

Cuando en la red existe una discontinuidad de impedancia, aparecen fenómenos de reflexión en la propagación de las ondas de sobretensión. Al considerar el sistema formado por las

dos líneas ideales de la Figura 5.8, cuyas impedancias características son  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  respectivamente, cuando aparece una onda de tensión incidente  $v_i$  que va desde la línea 1 hacia la línea 2, la tensión transmitida a la línea 2 se puede expresar según (5.3)

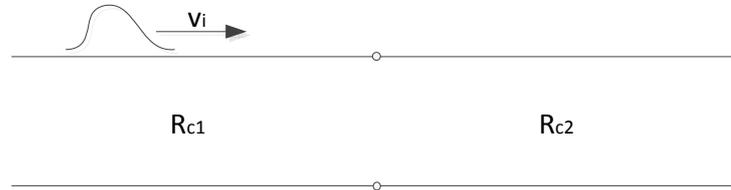


Figura 5.8: Punto de discontinuidad

$$v_t = (1 + \Gamma) \cdot v_i \quad (5.3)$$

donde

$$1 + \Gamma = \frac{2 \cdot R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} \text{ es el coeficiente de transmisión}$$

Asimismo, cuando la onda  $v_i$  llegue al punto de discontinuidad de impedancia, también aparecerá una onda de tensión reflejada  $v_r$  expresada según (5.4).

$$v_r = \Gamma \cdot v_i \quad (5.4)$$

donde

$$\Gamma = \frac{R_{c2} - R_{c1}}{R_{c2} + R_{c1}} \text{ es el coeficiente de reflexión}$$

Cabe observar que cuando las dos impedancias son iguales, toda la onda  $v_i$  será transmitida a la línea 2. En cambio, cuando se tiene una línea con el extremo abierto (la impedancia en el extremo vale  $\infty$ ) toda la onda será reflejada doblando el valor de la tensión.

Cuando hay una bifurcación (Figura 5.9), se puede representar la impedancia equivalente según  $R_{eq} = R_{c2} // R_{c3}$ . Cuando las impedancias características de las tres líneas son iguales, los coeficientes de reflexión y transmisión serán  $-0,5$  y  $0,5$  respectivamente por lo que la tensión transmitida a las líneas 2 y 3 será la mitad de la tensión incidente como se muestra en la Figura 5.9

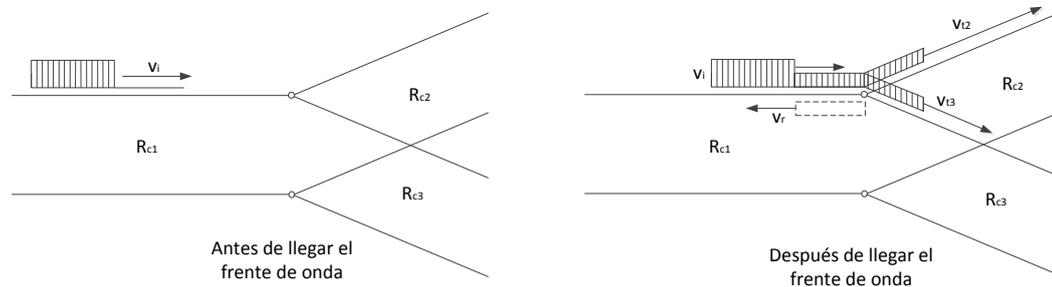


Figura 5.9: Reflexión y transmisión de ondas en una bifurcación

Para mostrar este efecto en el caso de la caída de un rayo a tierra, se realiza una simulación en una línea de 1 km de longitud con vanos de 100 m e impedancia característica en los extremos, otra en la misma línea pero con una bifurcación (tramo n9-n12) según la Figura

5.10 y finalmente una simulación en la línea con bifurcación y terminaciones abiertas. La onda de corriente de los rayos simulados tiene una corriente de cresta  $I_c = 30$  kA, un tiempo de cresta  $T_c = 2 \mu s$  y un tiempo de cola  $T_h = 50 \mu s$ . La velocidad de la corriente de retorno es de  $1,2 \cdot 10^8$  m/s, la altura de la línea es de 10 m y la conductividad del terreno de 1 mS/m. El rayo impacta a una distancia de la línea  $d = 100$  m según la Figura 5.10.

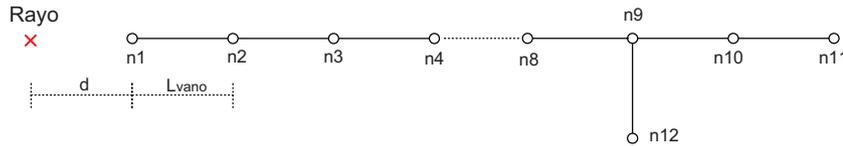


Figura 5.10: Geometría de la línea e impacto de un rayo

El resultado de las simulaciones se muestra en la Figura 5.11. Como se puede observar, cuando la línea tiene impedancia característica en los extremos y una ramificación, la sobretensión al final de la línea disminuye respecto al mismo caso sin ramificación. En este caso, el modelo de línea es un modelo con fuentes distribuidas y la onda de tensión que se propaga no es en forma de escalón por lo que no se ha reducido exactamente a la mitad. Por otro lado, cuando los extremos de la línea están abiertos la tensión en el mismo extremo aumenta considerablemente (en este caso más del doble). Se puede concluir pues, que la estructura de la red resulta muy importante en el cálculo de sobretensiones por lo que el modelo de Agrawal, el cual puede tener en cuenta el efecto de las ramificaciones, representa en estos casos la metodología más adecuada para el cálculo de sobretensiones.

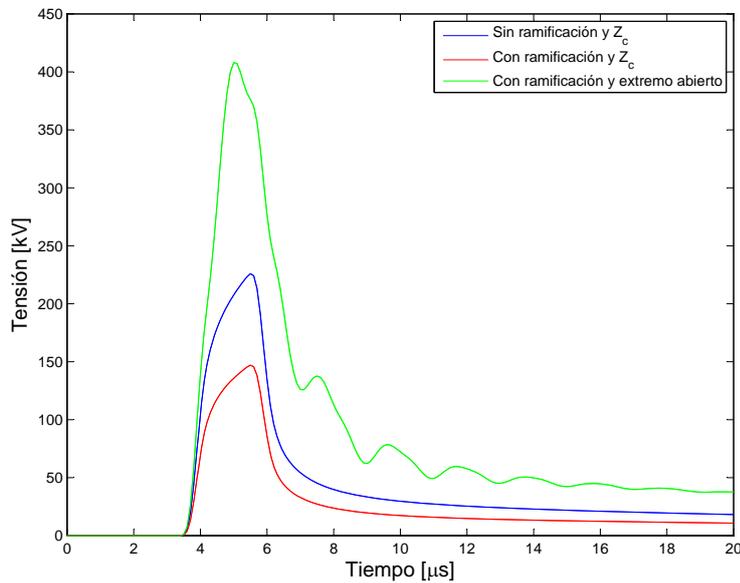


Figura 5.11: Sobretensión en el nodo 11 producida por un rayo según la configuración de la línea

## Capítulo 6

# Modelado de los pararrayos

Para reducir las sobretensiones inducidas por descargas indirectas, se propone la utilización de pararrayos de ZnO. Estos dispositivos están formados por elementos resistivos no lineales (varistores de ZnO) y su funcionamiento se basa en el hecho que cuando la tensión entre los extremos es menor que un cierto valor, el pararrayos actúa como si fuera un aislador. Por otro lado, cuando la tensión entre sus extremos es demasiado elevada, el pararrayos actúa como un elemento de baja impedancia (conductor) derivando a tierra las cargas asociadas a la sobretensión atmosférica.

La versión más simple de un modelo de pararrayos consiste en una resistencia no lineal (típicamente una resistencia caracterizada por la curva tensión-corriente). Sin embargo, se ha visto que el pararrayos presenta un comportamiento dependiente de la frecuencia por lo que se requieren modelos más complejos que expliquen su funcionamiento frente a las sobretensiones atmosféricas. Entre los modelos propuestos en la literatura se trabajará con el propuesto en [15] ya que en el cómputo de sobretensiones mediante el software EMTP-ATP es el único que converge en el 100 % de los casos probados. En la Figura 6.1 se muestra el modelo de pararrayos. La resistencia  $R$ , de  $1 \text{ M}\Omega$  únicamente tiene la función de evitar problemas numéricos. Los valores de las inductancias se encuentran a partir de las expresiones (6.1) y (6.2). Las resistencias no lineales  $A_0$  y  $A_1$  se caracterizan por las curvas de la Figura 6.2.

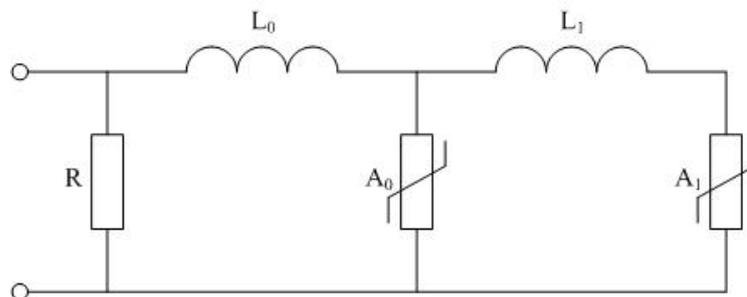


Figura 6.1: Representación del modelo de pararrayos utilizado

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \left( \frac{V_{r1/T_2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \right) \cdot V_n \quad (6.1)$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{V_{r1/T_2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \right) \cdot V_n \quad (6.2)$$

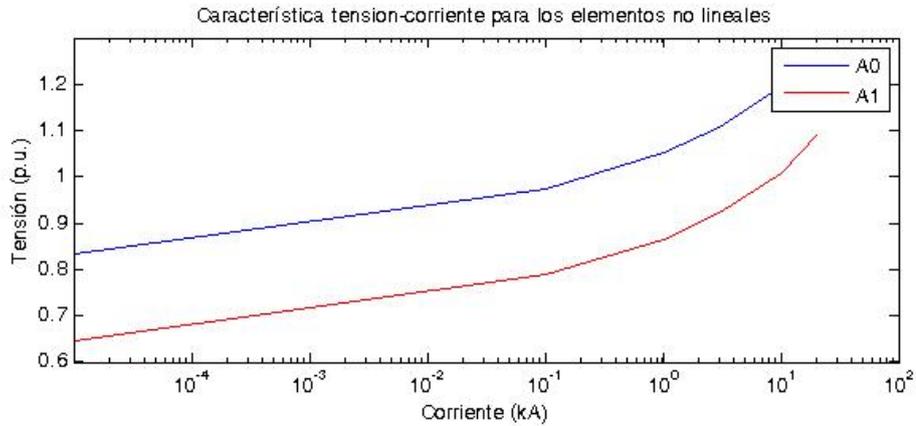


Figura 6.2: Curva característica para las resistencias no lineales  $A0$  y  $A1$ . La tensión está referida a  $V_{r8/20}$ .  $V_{r8/20}$  es el valor de pico de la tensión residual en el pararrayos en un ensayo tipo rayo con un impulso de 10 kA y forma de onda 8/20  $\mu s$

donde

$V_{r8/20}$  es el valor de pico de la tensión residual en el pararrayos en un ensayo tipo rayo con un impulso de 10 kA y forma de onda 8/20  $\mu s$

$V_{r1/T_2}$  es el valor de pico de la tensión residual en el pararrayos en un ensayo con un impulso de frente rápido 10 kA y forma de onda 1/ $T_2$   $\mu s$ . El valor de pico de la tensión solo es afectado por el tiempo de frente

$V_n$  es la tensión nominal del pararrayos

## Capítulo 7

# Algoritmo genético para optimizar el número y la ubicación de pararrayos

### 7.1. Introducción

Cuando un rayo impacta a tierra aparecen sobretensiones inducidas en las redes aéreas. Generalmente los equipos conectados a las redes de distribución ya están debidamente protegidos (por ejemplo los transformadores). Sin embargo, a lo largo de la red y cuando la sobretensión supera cierto nivel, pueden aparecer contorneos en los aisladores de las torres produciendo faltas temporales o permanentes. Para minimizar las pérdidas económicas debidas a estas faltas se propone colocar pararrayos en los apoyos. Con este fin se debe determinar la cantidad de pararrayos que colocar así como su ubicación en la red. En este capítulo se propone una metodología para, dada una valoración del coste de un contorneo (coste económico), determinar los pararrayos necesarios y su ubicación.

La optimización de un problema determinado consiste en el proceso de tratar de encontrar la mejor solución (en este caso los pararrayos a instalar en una red aérea de distribución). Algunos problemas de optimización pueden resolverse de forma fácil como por ejemplo los problemas lineales que pueden ser resueltos mediante el método simplex. Por otro lado, la mayoría de problemas de optimización tienen no linealidades y valores enteros que no pueden ser resueltos con algoritmos de optimización convencionales. Para resolver estos problemas se han desarrollado métodos eficientes para encontrar soluciones los cuales reciben el nombre de métodos heurísticos. La desventaja de estos métodos es que no está garantizado que el algoritmo encuentre el óptimo global (aunque suele dar buenas soluciones).

Dada la naturaleza aleatoria del rayo, resulta necesario utilizar dichos métodos heurísticos para encontrar un óptimo. Concretamente, se utilizará una metodología mediante algoritmos genéticos (GA).

### 7.2. Fundamentos de los algoritmos genéticos

Los GA son algoritmos basados en el proceso genético de los seres vivos que, según los postulados de Darwin, las poblaciones evolucionan en la naturaleza con principios de selección

natural y supervivencia de los más fuertes.

En la naturaleza, los individuos de una población compiten entre sí para la búsqueda de recursos y la supervivencia. Los individuos más fuertes tienen una mayor probabilidad de atraer otros individuos hacia ellos y reproducirse. Por lo tanto, los genes de los más fuertes tienen mayor probabilidad de pasar a las siguientes generaciones las cuales se mostraran mejor adaptadas al entorno. Este comportamiento representa una analogía del funcionamiento de los GA.

Los GA parten de una población de individuos donde cada individuo representa una posible solución del problema. A cada individuo de la población se le asigna una puntuación de acuerdo con su bondad con la función objetivo. Los individuos con mejor puntuación tienen mayor probabilidad de ser seleccionados para reproducirse con otros y así pasar su material genético a las generaciones posteriores. Cuando dos individuos son seleccionados para su supervivencia estos se reproducen dejando paso a nuevas generaciones de individuos con la propiedad que esta nueva generación tiene una mayor cantidad de buenas características. A lo largo de las generaciones, las buenas características se propagan generando cada vez individuos mejor adaptados.

Los individuos pueden representarse como un conjunto de genes los cuales, agrupados, forman un cromosoma (posible solución). Aunque existen muchas formas de representar los genes, es habitual que sean descritos en codificación binaria donde el 0 es la carencia de una característica y el 1 significa que el individuo dispone de la característica.

La secuencia general de un GA se puede explicar según los siguientes pasos:

- **Codificación:** en la codificación se identifican los parámetros del problema para poder representar cada individuo mediante un cromosoma. La codificación debe ser de manera que la información genética pueda representarse de forma única.
- **Generación de la primera población:** al empezar el GA, se debe generar una población inicial. Para ello hay principalmente dos estrategias: generar los individuos de la población inicial de forma aleatoria o bien, si se conocen buenas características de los individuos, se puede generar la primera población de forma que sus individuos tengan estas características. En este segundo caso se llegará antes a la convergencia pero el espacio de soluciones explorado puede verse reducido. Habitualmente la generación aleatoria de la primera población da mejores resultados.
- **Evaluación:** en la evaluación de un individuo se obtienen los resultados de la función objetivo que se quiere maximizar o minimizar. En este proceso se evalúan todos los individuos de una población.
- **Selección:** para seleccionar los individuos que sobreviven en una generación y pasan al proceso de reproducción se asigna una probabilidad de supervivencia a cada individuo de acuerdo con el valor de la función objetivo. Existen muchas formas de realizar la selección, por ejemplo con una probabilidad proporcional a la función objetivo, ordenando los individuos según su función objetivo y asignando una probabilidad de supervivencia dependiendo de la posición, etc. A parte de la selección aleatoria de individuos según sus probabilidades de supervivencia, es posible adoptar otras estrategias como por ejemplo forzar que el mejor individuo pase siempre a la siguiente generación.

Los individuos seleccionados pasarán posteriormente al proceso de reproducción.

- **Reproducción:** en este proceso dos individuos que han sido seleccionados para su supervivencia generan nuevos individuos (hijos) que heredan sus características (genes).

- **Mutación:** según el proceso evolutivo, las características genéticas se pasan de una generación a otra. Sin embargo, existe una probabilidad de que aparezca un gen diferente al de los padres. De forma similar, la mutación en los GA se realiza asignando una probabilidad de mutación (normalmente baja) a cada gen. Para cada gen se genera un número aleatorio que si es menor a la probabilidad, el gen permuta de valor (codificación binaria).

La mutación permite explorar nuevas posibles soluciones con características inexistentes en la población anterior. De esta forma se consigue una mejor exploración del espacio de soluciones. Por otro lado, si la probabilidad de mutación es demasiado elevada, es posible que el algoritmo no llegue a ninguna solución. Por esta razón, es habitual implementar los GA de forma que la probabilidad de mutación cambie a lo largo de las generaciones según una estrategia concreta.

- **Finalización:** el GA finaliza según algún criterio de finalización. Éste puede ser según un número predefinido de generaciones o bien analizando la variabilidad de la función objetivo a lo largo de las generaciones.

La Figura 7.1 muestra el diagrama de flujos de un GA.

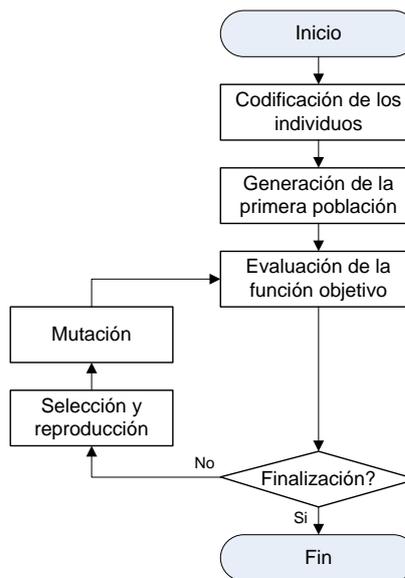


Figura 7.1: Representación del diagrama de flujos de un GA

En las siguientes secciones se detalla el GA diseñado en este proyecto.

### 7.3. Codificación de un individuo

Un individuo (posible solución del problema) se caracteriza por representar los pararrayos que han de colocarse y su ubicación. Las torres de la línea se codifican con un número desde 1 hasta  $n$ , siendo  $n$  el número total de torres. De esta manera el individuo se representa con un vector de longitud  $n$  donde en cada posición  $i$  se coloca un 1 si en la torre  $i$  hay un pararrayos o un 0 en caso contrario. La Figura 7.2 muestra un posible individuo.

1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 7.2: Representación de un posible individuo en una red de 12 torres. 4 pararrayos situados en las torres 1, 5, 7 y 8

## 7.4. Generación de la primera población

El primer conjunto de soluciones a partir del cual empieza el algoritmo genético se realiza de forma aleatoria. Es obvio que colocar un pararrayos a cada torre es el mejor escenario posible, pero es evidente que resulta económicamente inviable. Para que las soluciones generadas aleatoriamente se aproximen desde un inicio a una solución aceptable, se asigna una probabilidad de  $1/5$  que en una torre  $i$  se coloque un pararrayos.

El tamaño de la población es otro aspecto a determinar. Las poblaciones de pocos individuos tienen el riesgo de no cubrir de forma adecuada el espacio de soluciones, mientras que poblaciones con muchos individuos pueden requerir un excesivo tiempo de computación. En [16] se determinó que el número adecuado de individuos está entre  $n$  y  $2 \cdot n$  siendo  $n$  el número de genes de un individuo. No obstante, en este trabajo se ha determinado un número de 8 individuos por población (4 padres y 4 hijos) para no excederse en el tiempo de optimización.

## 7.5. Función objetivo

### 7.5.1. Determinación de la función objetivo

La función objetivo representa el ahorro en los costes producidos por los rayos indirectos respecto al caso inicial (sin añadir pararrayos). Puesto que la función objetivo debe evaluarse reiteradamente ésta debe poder ser evaluada en tiempo aceptable.

Para evaluar el beneficio es necesario poder realizar una predicción del número de contorneos. Utilizar la metodología del capítulo anterior resulta inviable debido al número de escenarios a evaluar pero será útil para verificar los resultados. En este caso, la predicción de la tasa de contorneos (y por lo tanto, del número de contorneos) se realiza a partir del riesgo.

Cuando para cada rayo se determina la sobretensión máxima en la red, es posible encontrar una función de densidad de probabilidad de sobretensión (identificada como normal-logarítmica). La Figura 7.3 muestra el resultado obtenido en el caso del capítulo 8.1 con la generación de 1000 rayos (donde la tasa de contorneos se ha estabilizado).

A partir de ésta función de densidad de probabilidad,  $f(V)$ , es posible encontrar el riesgo,  $R$ , o probabilidad de contorneo según la expresión (7.1) cuyo concepto se muestra en la Figura 7.4. A partir del riesgo, se realizará la predicción de contorneos.

$$R = \int_0^{\infty} f(V) \cdot p(V) dV \quad (7.1)$$

donde

$R$  es el riesgo de contorneo

$f(V)$  es la densidad de probabilidad de sobretensión

$p(V)$  es la probabilidad de contorneo (0 si  $V < 1,5 \cdot CFO$  y 1 en caso contrario)

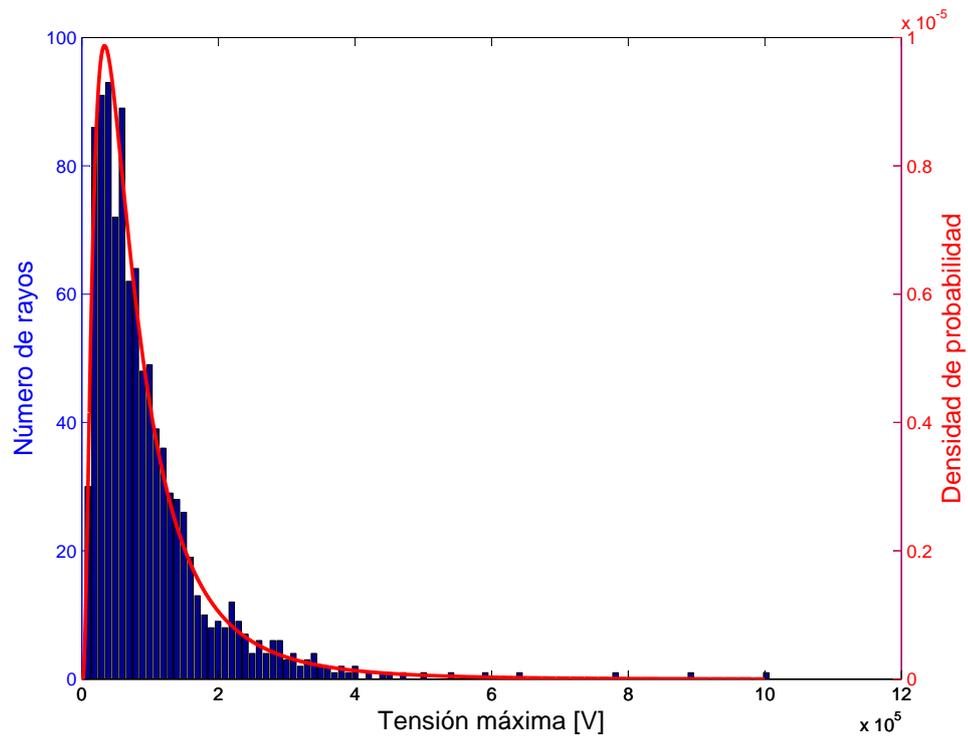


Figura 7.3: Histograma de las sobretensiones máximas y su distribución de probabilidad normal-logarítmica

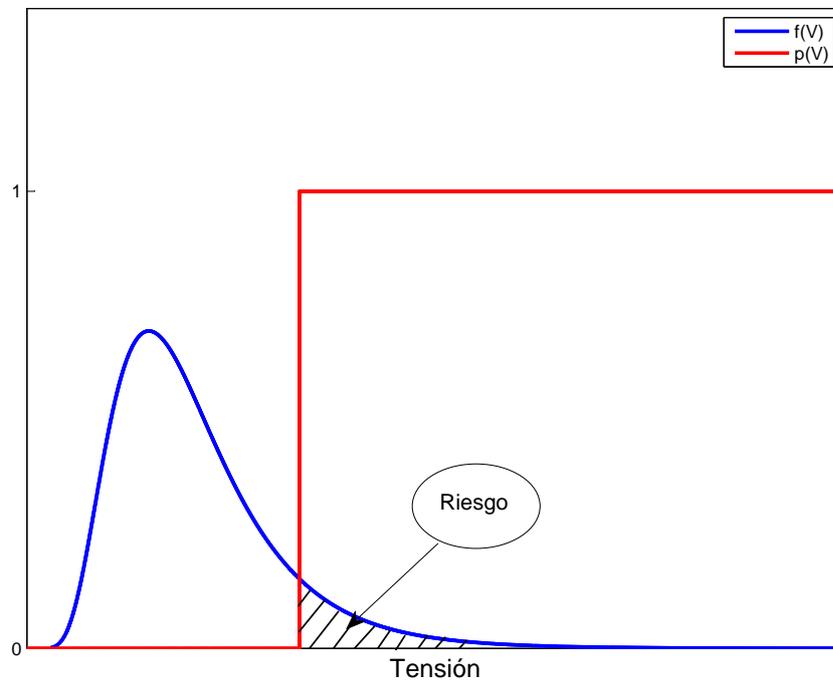


Figura 7.4: Riesgo de contorneo por una descarga indirecta

Para modelar mejor el problema, se tiene en cuenta que los apoyos o torres en una misma red pueden tener un CFO diferente dado que el material de la estructura, la distancia entre cables, el tipo de aislador, etc. pueden afectar a este valor [2].

Si para cada rayo se determina la diferencia entre la tensión máxima en cada torre y su CFO multiplicado por 1,5 se obtendrá un margen de sobretensión. Si el margen es negativo significa que la sobretensión máxima en la torre no supera la tensión para la que se produce el contorno y en caso contrario, sí (y por lo tanto se produce contorno). Si para cada rayo se determina el máximo margen de sobretensión entonces se puede observar que se distribuye según una ley parecida a la normal-logarítmica (Figura 7.5) pero con valores negativos. Dado que la probabilidad de contorno es cero para tensiones inferiores a  $1,5 \cdot \text{CFO}$  y 1 en caso contrario, el riesgo puede calcularse a partir de la probabilidad de que el margen sea mayor que 0 integrando su función de densidad de probabilidad entre 0 y  $\infty$ .

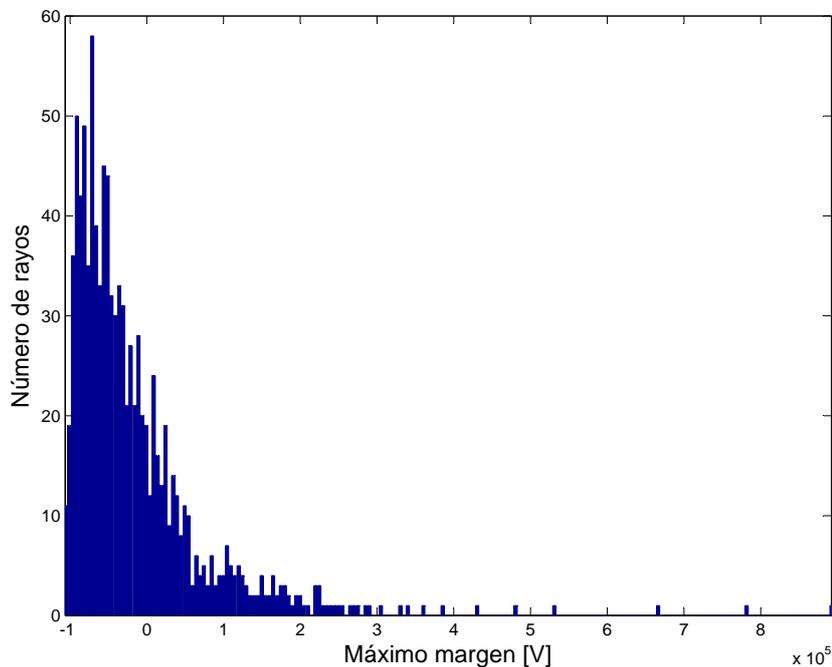


Figura 7.5: Histograma de los máximos márgenes de sobretensión

Para poder obtener la distribución de probabilidad, se desplazan los márgenes obtenidos para que todos sean positivos y se ajusta la distribución de probabilidad (Figura 7.6 con un CFO constante de 75 kV). La Figura 7.7 muestra la bondad del ajuste con un p-valor de 0,52 y mayor que 0,05 (valor habitual de referencia) por lo que se confirma que una ley normal-logarítmica describe adecuadamente la distribución. Para tener en cuenta el desplazamiento que se ha realizado, se calcula el riesgo como la probabilidad de que la sobretensión sea mayor que el desplazamiento (que será llamado *offset*) según la expresión (7.2).

$$R = \int_{offset}^{\infty} f(m)dm \quad (7.2)$$

donde

$f(m)$  es la densidad de probabilidad del margen

*offset* es el desplazamiento que se ha realizado a la distribución de probabilidad

$R$  es el riesgo o probabilidad de contorno

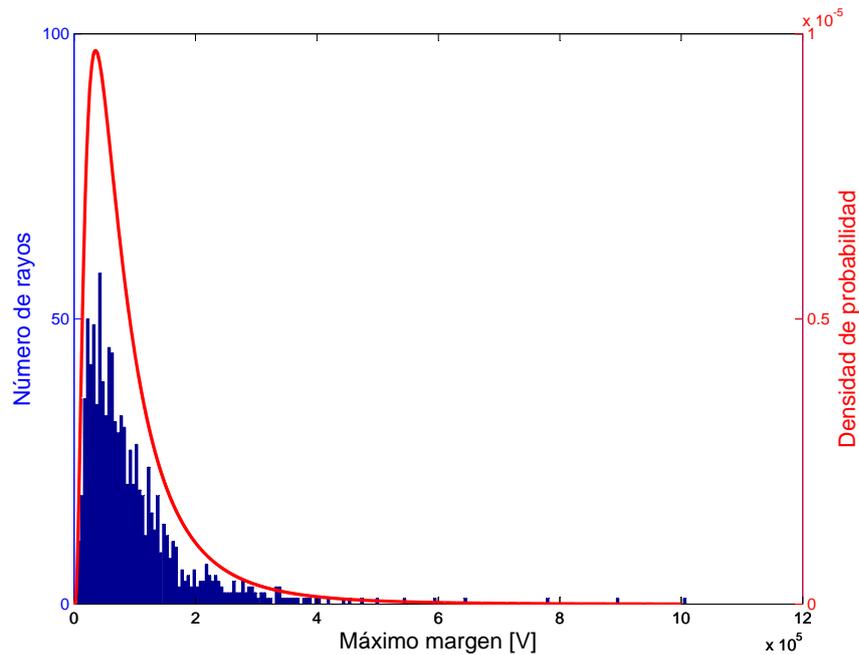


Figura 7.6: Histograma de los máximos márgenes desplazados y su distribución de probabilidad normal-logarítmica para un CFO constante de 75 kV

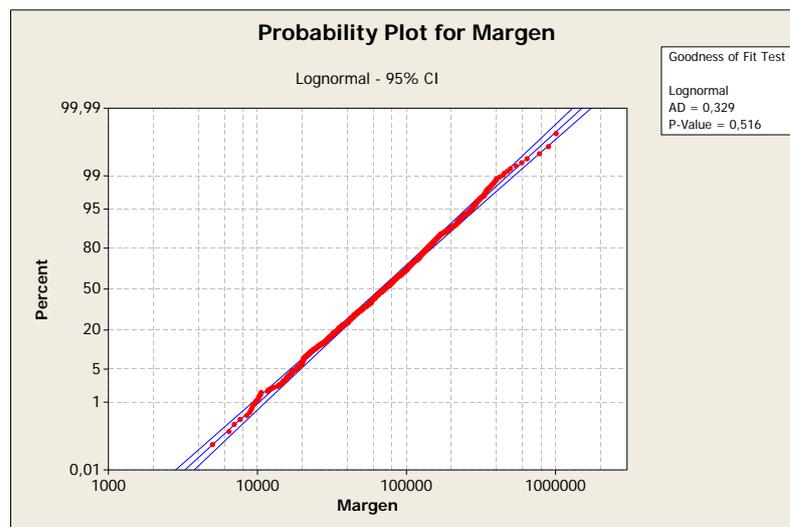


Figura 7.7: Bondad del ajuste de la distribución de probabilidad

Una vez conocido el riesgo, se puede realizar una previsión de la reducción (en un año) del número de contorneos provocados por rayos cuando se añaden pararrayos según la expresión (7.3). En esta expresión se toma la hipótesis que el número de rayos directos en el área de estudio es despreciable respecto al número de rayos indirectos (se ha observado que representa alrededor del 2%)

$$N_r = (R_b - R) \cdot N_g \cdot A \quad (7.3)$$

donde

$N_r$  es la reducción del número de rayos que producen contorneo en un año (reducción del caso con pararrayos respecto al caso inicial)

$R_b$  es el riesgo en el caso inicial (sin añadir pararrayos)

$R$  es el riesgo en el caso con pararrayos

$N_g$  es la densidad de descargas a tierra en *descargas/km<sup>2</sup>/año*

$A$  es el área de estudio en km<sup>2</sup>

A partir de  $N_r$  y cuantificando el coste de un contorneo puede calcularse el beneficio de instalar pararrayos según la expresión (7.4).

$$b = N_r \cdot T \cdot C_{cont} - C_{par} \cdot N_{par} \quad (7.4)$$

donde

$N_r$  es la reducción del número de rayos que producen contorneo en un año  $T$  es la vida útil de un pararrayos en años

$C_{cont}$  es el coste estimado de un contorneo en la línea

$C_{par}$  es el coste de instalar un pararrayos

$N_{par}$  es el número de pararrayos a instalar  $b$  representa el beneficio

La función objetivo pues, consiste en maximizar el beneficio según (7.5).

$$F_{obj} = [MAX]b \quad (7.5)$$

### 7.5.2. Número de casos a simular

Para calcular la función objetivo se requiere ajustar la distribución de probabilidad del margen (desplazado) por lo que se hace necesario determinar el número de rayos a simular para ajustar las distribuciones de probabilidad. La principal limitación es el tiempo de cómputo. El tiempo de simulación es de unos 5 s/rayo en un ordenador HP Compaq Pro 4300 con procesador Intel Core i3 de 3 GHz, de esta manera si se tienen 8 posibles soluciones por iteración (4 nuevas y 4 iguales que la iteración anterior) y una limitación de iteraciones de 200, el tiempo de cómputo se puede calcular según (7.6).

$$t_{comp} \simeq \frac{4 \cdot 200 \cdot 5 \cdot N_{rayos}}{3600} = 1,11 \cdot N_{rayos} \quad (7.6)$$

donde

$t_{comp}$  es el tiempo de cómputo del algoritmo genético en horas

$N_{rayos}$  es el número de rayos a simular para evaluar la función objetivo

Se puede observar que al incrementar el número de rayos en 10 unidades el tiempo necesario para procesar el algoritmo aumenta en unas 11 horas (realmente es menor ya que individuos repetidos no se vuelven a simular).

El número de rayos a simular será pues un compromiso entre el tiempo y la precisión. Para valorar la precisión, se coge una muestra de 1000 rayos y se ajusta la distribución densidad de probabilidad del margen de sobretensión ( $\mu_{lnx}$  y  $\sigma_{lnx}$ ). Esta distribución se toma como distribución de referencia y se calcula el error cometido en los parámetros cuando se ajusta la distribución para cierto número de rayos.

La Figura 7.8 muestra el error cometido en la estimación de parámetros de la distribución de probabilidad del margen. Como se observa, el error del valor medio resulta muy pequeño

en cualquier caso, mientras que el de la desviación disminuye rápidamente y a partir de 30 rayos tiende a estabilizarse por lo que se decide realizar la optimización con simulaciones de 30 rayos.

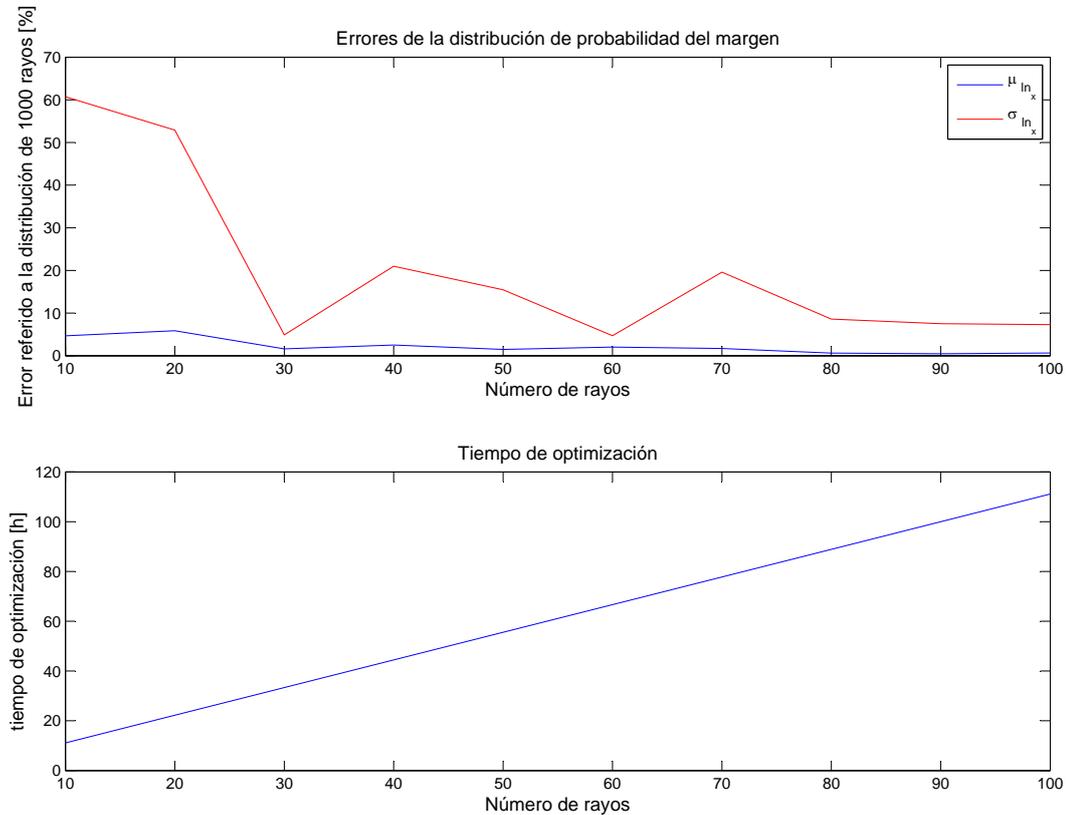


Figura 7.8: Errores en el ajuste de la distribución de probabilidad referidos al ajuste con una simulación de 1000 rayos y tiempo de cómputo aproximado en función del número de rayos

Dado que el número de rayos resulta muy reducido, la optimización puede depender de la muestra de rayos. Es por esto que en la validación de la metodología se ejecuta repetidamente el GA con muestras de rayos diferentes.

### 7.5.3. Evaluación final

Se ha observado que cuando se colocan pararrayos la distribución de los márgenes no siguen exactamente una ley normal-logarítmica (aunque sí se aproxima). Las Figuras 7.9 y 7.10 muestran la distribución de probabilidad y la bondad del ajuste respectivamente cuando se han instalado pararrayos en el escenario.

Aunque el procedimiento pueda resultar útil para la optimización, cuando se obtiene la ubicación óptima de los pararrayos, se realiza el cómputo de la función objetivo a partir de la tasa de contorneos según la metodología del capítulo 5.

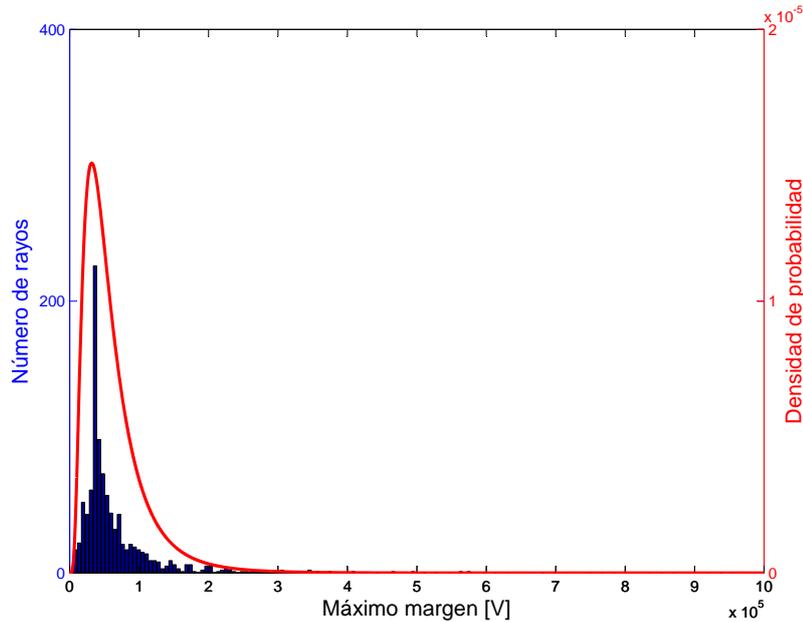


Figura 7.9: Histograma de los máximos márgenes desplazados y su distribución de probabilidad normal-logarítmica para un CFO constante de 75 kV y pararrayos instalados

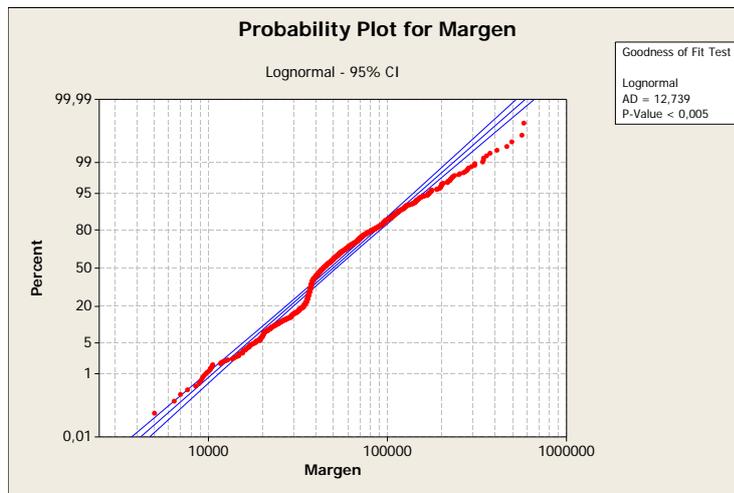


Figura 7.10: Bondad del ajuste de la distribución de probabilidad

## 7.6. Selección de padres

La selección de padres para generar una nueva población se realiza al azar de una forma que favorezca la selección de los mejores individuos. La selección se ha realizado de tres formas distintas. La primera, de forma proporcional a la función objetivo. La segunda, de forma proporcional a  $b - \min(b)$ . La tercera forma se realiza igual que la segunda pero asegurando que el mejor individuo pasa a la siguiente generación. Cabe observar que en la segunda y tercera estrategias de selección, el peor individuo nunca resulta seleccionado.

Puesto que se ha determinado de forma experimental que la primera forma no da bue-

nos resultados y que la segunda requiere un tiempo de computación excesivamente elevado (demasiadas generaciones), se presentan los resultados obtenidos con el tercer método de selección.

En total son seleccionados 4 padres para la supervivencia y reproducción.

## 7.7. Reproducción

En el proceso de reproducción se seleccionan dos parejas de padres. Cada pareja de padres genera dos hijos a partir de un operador de cruce. El operador de cruce determina las características de los padres que heredan los hijos. Para ver el proceso se muestra un ejemplo.

Si se tiene un caso de  $n$  torres, se genera un número entero aleatorio (operador de cruce),  $rnd$  entre 1 y  $n - 1$ . Entonces la reproducción se realiza según la Figura 7.11.

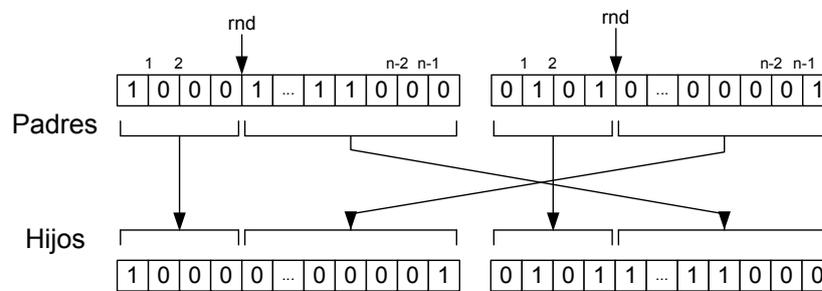


Figura 7.11: Proceso de reproducción

De esta forma, se generan nuevos individuos con las características de los individuos seleccionados de la población anterior. Puesto que estos individuos han sido seleccionados según la función objetivo, el proceso tiende a mejorar la población.

## 7.8. Mutación

Una vez se han creado los nuevos individuos (hijos), existe una probabilidad que sus características sean mutadas ampliando el espacio de búsqueda. La mutación se realiza para cada torre (gen), según una probabilidad. Cuando un elemento es mutado, el valor de dicho elemento dentro del individuo cambia de valor, de 0 a 1 o de 1 a 0. Inicialmente la probabilidad de mutación se fija en un 10% y va disminuyendo a lo largo de las iteraciones hasta llegar al 1%. De esta forma, inicialmente las características de los individuos cambian considerablemente y, en las últimas iteraciones, prácticamente no se modifican. Así se consigue una búsqueda de posibles soluciones más amplia y dispersa en el inicio y, a medida que se va encontrando una buena solución, las características de los individuos solo cambian ligeramente sin desviarse o romper cualquier patrón de búsqueda.

Por otro lado, si se produce una convergencia demasiado rápida es posible que la solución encontrada no sea buena. Para evitarlo, la probabilidad de mutación aumenta al 5% cuando en las últimas 20 generaciones la función objetivo no ha mejorado.

## 7.9. Finalización

La finalización del algoritmo genético se realiza mediante la limitación del número de iteraciones y mediante un criterio de convergencia.

Se ha visto que el tiempo es un factor fundamental por lo que se ha limitado el número de iteraciones a 200. Por otro lado, cuando en las últimas 50 iteraciones la función objetivo no ha mejorado, se considera que el GA ha convergido.

## 7.10. Implementación de la metodología

Para resumir la metodología, el proceso puede ser dividido en la ejecución del GA y en una evaluación final de la función objetivo utilizando la metodología del capítulo 5.

Para la ejecución del GA primeramente se modela la red mediante el ATPdraw creando un fichero con extensión .ATP el cual es importado al MATLAB. A continuación, se ejecutan las 30 simulaciones (rayos) mediante el EMTP-ATP y se calcula el riesgo para la red sin pararrayos. Posteriormente se genera la primera población y, para cada individuo, se modifica el fichero .ATP añadiendo los pararrayos correspondientes, se realizan las 30 simulaciones y se calculan el riesgo y la función objetivo para la red con pararrayos. Una vez evaluada toda la población, si se ha llegado al límite de generaciones, o en las últimas 50 generaciones no se ha mejorado la función objetivo, el GA ha finalizado. En caso contrario se realizan los procesos de selección, reproducción y mutación según el esquema de la Figura 7.12.

La evaluación final se realiza para obtener un valor más realista del beneficio en el caso optimizado. En este caso se utiliza la metodología del capítulo 5 para obtener la tasa de contorneos ya que es la metodología utilizada en la literatura así como en la norma del IEEE [2] y proporciona valores más reales al no tener que ajustar distribuciones de probabilidad. Puesto que los ficheros .ATP del caso base y del caso óptimo han sido guardados, el procedimiento a seguir es el que se muestra en la Figura 5.3. Un aspecto a tener en cuenta es que en este caso, las dos coordenadas del rayo se generan de forma aleatoria por lo que la tasa de contorneos se evalúa según la expresión (7.7).

$$TC = \frac{N}{N_{rayos}} \cdot N_g \cdot A \cdot \frac{100}{l} \quad (7.7)$$

Donde

$TC$  es la tasa de contorneos (contorneos/100km de línea/año)

$N$  es el número de contorneos

$N_{rayos}$  es el número de rayos generados

$N_g$  es la densidad de descargas (descargas/km<sup>2</sup>/año)

$A$  es el área de estudio en km<sup>2</sup> (área sobre la cual puede caer un rayo)

$l$  es la longitud de la línea de estudio en km

De esta manera, se realiza el método de Monte Carlo según el capítulo 5 para calcular las tasas de contorneo para el caso base y para el caso optimizado. El beneficio se calculará según la ecuación (7.8).

$$b = (TC_b - TC_{opt}) \cdot \frac{l}{100} \cdot T \cdot C_{cont} - C_{par} \cdot N_{par} \quad (7.8)$$

Siendo  $TC_b$  y  $TC_{opt}$  las tasas de contorneo del caso base y del caso optimizado respectivamente,  $l$  la longitud total de la línea,  $T$  la vida útil del pararrayos,  $N_{par}$  el número total de pararrayos y  $C_{cont}$  y  $C_{par}$  el coste de un contorneo y el de un pararrayos respectivamente.

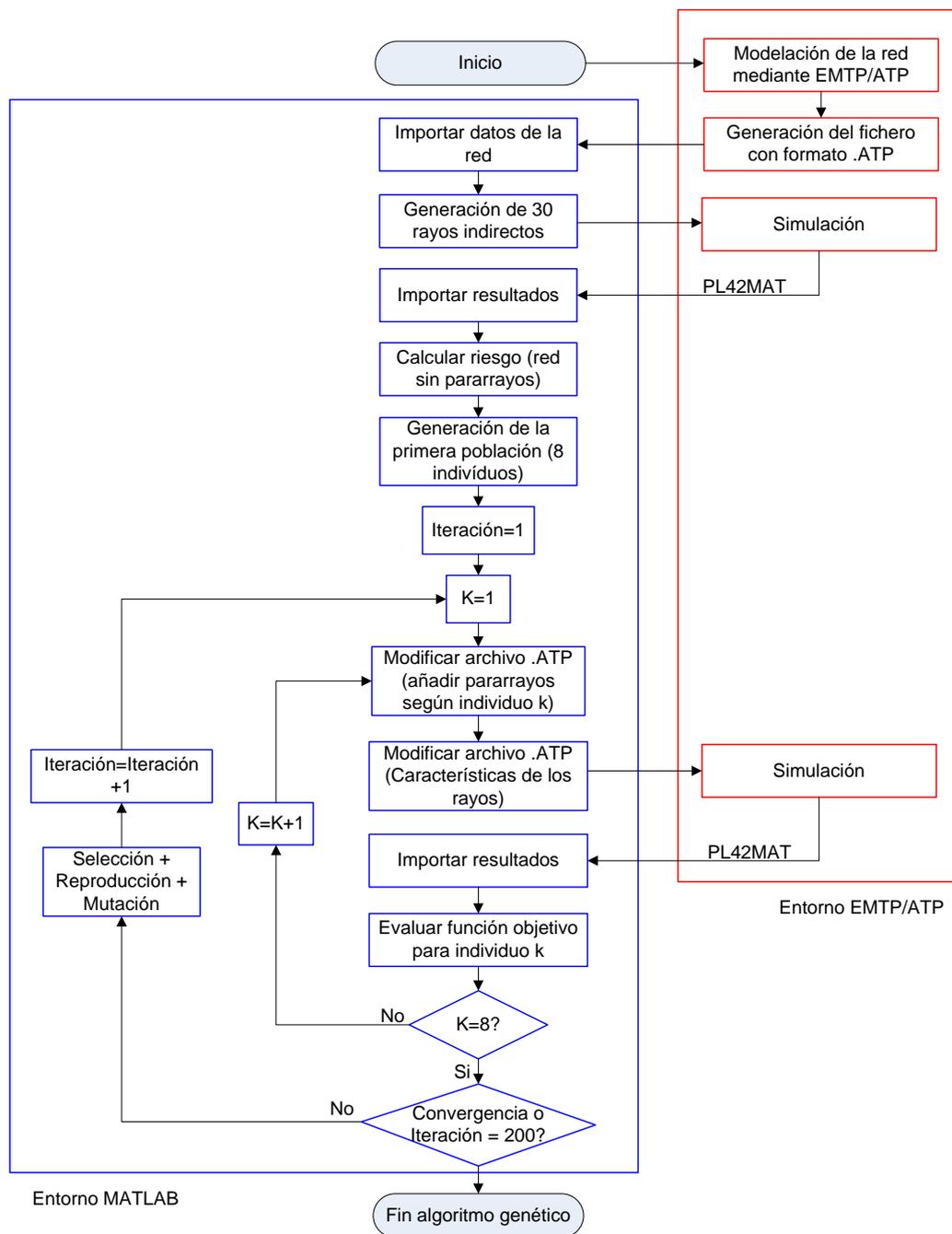


Figura 7.12: Esquema del algoritmo genético



## Capítulo 8

# Aplicación de la metodología a una red de distribución

Para validar la metodología se ha creado un escenario cuya geometría se muestra en la Figura 8.1 la cual es la misma que la utilizada en [12] en la que se realiza por primera vez una optimización de la colocación de pararrayos para mejorar el comportamiento de la red frente a descargas indirectas a partir de un número fijo de pararrayos. La red consta de 20 apoyos numerados (torres) de forma que existe un alimentador principal (T1-T14) y tres ramificaciones. Aunque la red de [12] se trata como trifásica, en este proyecto se simplifica a una red monofásica para aumentar la velocidad de computación. El modelo de acoplamiento para el cálculo de sobretensiones es el modelo de Agrawal implementado en [5] con una conductividad del terreno de 1 mS/m. El modelo de pararrayos se ha explicado en el capítulo 6 y sus características se muestran en la Tabla 8.1. El pararrayos es conectado entre fase y tierra suponiendo una puesta de tierra ideal de forma que el esquema eléctrico en el EMTP-ATP queda según la Figura 8.2. La altura de los apoyos se considera constante e igual a 10 metros, los parámetros del rayo siguen las leyes probabilísticas explicadas en el capítulo 3 y se utiliza el modelo electrogeométrico IEEEStd1410-2004. El CFO es de 75 kV (valor aproximado obtenido de la norma IEC 60071-1 para una tensión nominal de 15.5 kV).

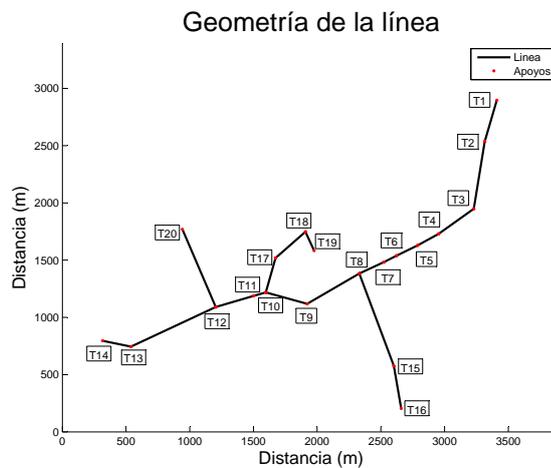


Figura 8.1: Geometría de la red de estudio y numeración de los apoyos

Tensión nominal [kV]	Máxima tensión en servicio continuo [kV]	Tensión residual con una forma de corriente de		Tensión residual con un impulso tipo rayo (8/20 $\mu$ s)		
		10 kA 1/5 $\mu$ s	20 kA 1/5 $\mu$ s	5 kA	10 kA	20 kA
20	16	50,7 kV	57,4 kV	44,2 kV	46,2 kV	51,0 kV

Tabla 8.1: Características del pararrayos

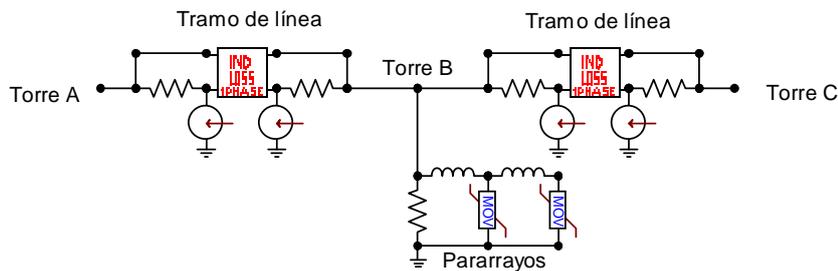


Figura 8.2: Esquema eléctrico en el EMTP-ATP de dos vanos de línea y un pararrayos

El coste de un pararrayos es 600 € con la instalación incluida (valor aproximado obtenido a partir de diferentes fuentes, entre ellas [17]). Por otro lado, las pérdidas económicas producidas por un contorneo son valoradas a partir de la energía no suministrada. En [18] se determinó que el coste de no entregar 1 kWh de energía en España en el año 2008 fue de 6 €. Este dato fue calculado teniendo en cuenta multitud de factores como la hora de la interrupción, los daños materiales, la pérdida de datos, etc. por lo que se considera adecuado para su aplicación en el caso de estudio. Partiendo de este dato, y suponiendo que un 5% de los contorneos producen una falta permanente (afectando a toda la línea) se calcula el coste de un contorneo según (8.1).

$$C_{cont} = 0,05 \cdot 6 \cdot P_{sub} \cdot t_{int} \quad (8.1)$$

donde

$P_{sub}$  es la potencia suministrada por la red (en este caso 2 MW)

$t_{int}$  es el tiempo medio de interrupción (0,5 h en este caso)

$C_{cont}$  es el coste de un contorneo (300 €)

A partir de la red de la Figura 8.1 se realizan simulaciones con diferentes escenarios. Primeramente se supone que todos los extremos de la red están abiertos por lo que aparecerán sobretensiones más elevadas como se ha visto en el capítulo 5.2. Este escenario, aunque no represente una red real, resulta útil para ver el funcionamiento correcto de la metodología (los pararrayos deberían tender a colocarse en los extremos). En este caso, la vida útil del pararrayos es de 10 años y  $N_g = 1$ . Se utilizan estos valores porque las tensiones son muy elevadas y podría resultar que se colocasen demasiados pararrayos y se observara el comportamiento correcto de la metodología.

El segundo escenario es el mismo que el caso anterior, pero las torres T17, T18 y T19 tienen un CFO de 200 kV (esto podría representar una rama con apoyos de madera los cuales añaden entre 90 kV y 200 kV al CFO de los aisladores).

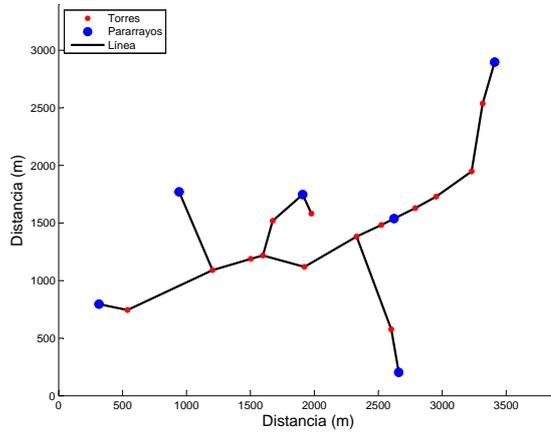
Finalmente, el tercer caso supone que la red es una zona concreta de una red mayor por lo que se colocan impedancias características en los extremos. Puesto que ya se trata de un caso real, la vida útil del pararrayos es de 40 años y la densidad de descargas,  $N_g = 2$  (la densidad de descargas se encuentra típicamente entre 2 y 4).

## 8.1. Línea con extremos abiertos y CFO constante

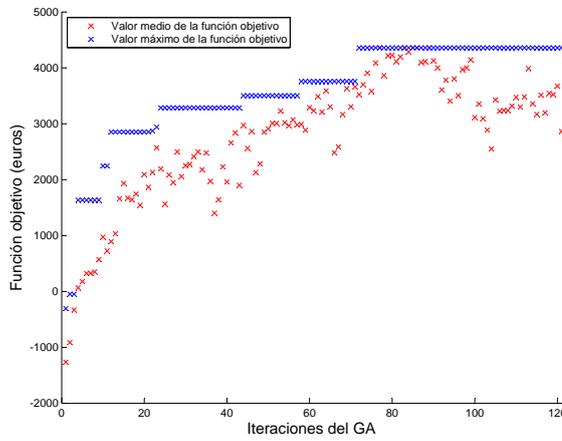
El primer caso, en el que se ha probado el algoritmo genético, es aquel en el que los extremos de la red están abiertos. En este caso, cuando haya una descarga aparecerán sobretensiones que se propagaran por la red y al llegar a los extremos tenderán a aumentar su valor. Así pues, las sobretensiones en los extremos resultaran mayores y el algoritmo debería tener una tendencia a colocar los pararrayos en estos puntos.

La Figura 8.3 muestra la ubicación de los pararrayos en el caso optimizado, la evolución del valor máximo de la función objetivo así como el valor medio a lo largo de las iteraciones y la tasa de contorneos en el caso sin pararrayos y en el caso optimizado para la evaluación final. El valor de la función objetivo (beneficio) cuando se calcula mediante la ecuación (7.8) es de 3172,9 €. Se puede comprobar, como era de esperar, que los pararrayos han sido ubicados en las terminaciones de la línea (o muy cerca de ellas) lo que justifica el correcto funcionamiento de la metodología cuando las terminaciones están abiertas. También se puede observar que en la iteración 44 del GA la función objetivo no ha mejorado en las últimas 20 iteraciones por lo que se aumenta la probabilidad de mutación. En este caso, justo a la iteración 45 el valor del beneficio ha aumentado (probablemente gracias a tener una probabilidad de mutación variable a lo largo de GA).

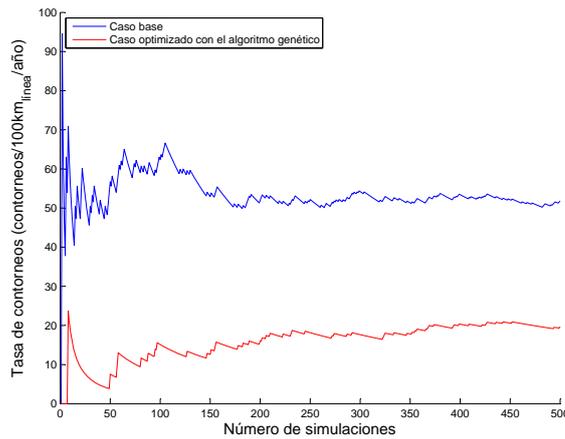
Dada la naturaleza aleatoria del rayo y de la metodología propuesta, se verifica que las condiciones iniciales (población inicial y rayos generados) no afectan al resultado de GA mediante una segunda ejecución. Así pues, al realizar la optimización una segunda vez se han obtenido los resultados de la Figura 8.4. En este caso la convergencia (según el criterio de finalización) ha sido muy rápida pero sin afectar al resultado final el cual es prácticamente el mismo (pararrayos situados en los extremos de la línea) y la función objetivo tras ser evaluada a partir de la tasa de contorneos es de 3693,2 €. Otro aspecto a observar es que, a pesar de que se llegue a resultados parecidos, el valor de la función objetivo en el GA resulta algo diferente. Esto se podría evitar ejecutando la metodología con un número más elevado de rayos pero el tiempo de computación se vería fuertemente aumentado.



(a) Ubicación de los pararrayos tras la optimización

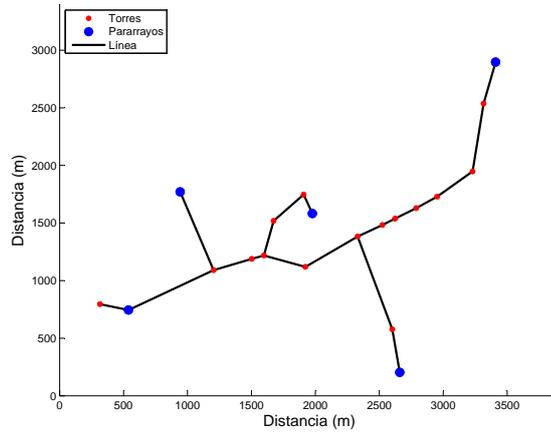


(b) Valores máximo y medio de la función objetivo a lo largo de las iteraciones

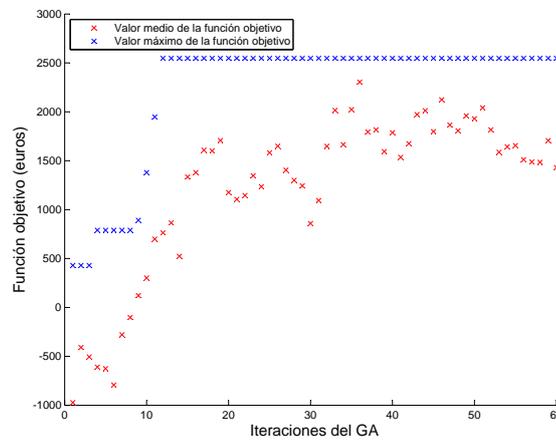


(c) Tasa de contorneos para el escenario base y para el caso optimizado calculada a partir de la metodología del capítulo 5 en función del número de rayos simulados

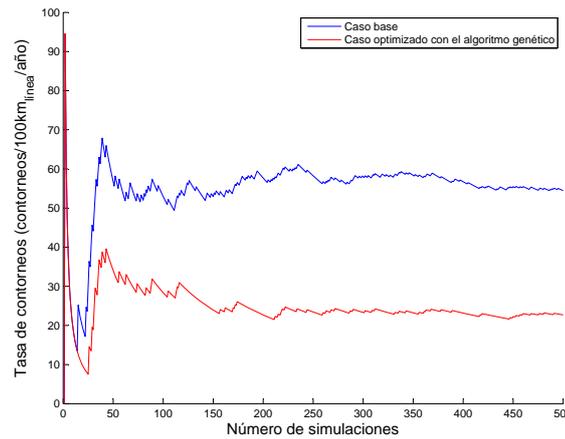
Figura 8.3: Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (primera ejecución). CFO constante



(a) Ubicación de los pararrayos tras la optimización



(b) Valores máximo y medio de la función objetivo a lo largo de las iteraciones



(c) Tasa de contorneos para el escenario base y para el caso optimizado calculada a partir de la metodología del capítulo 5 en función del número de rayos simulados

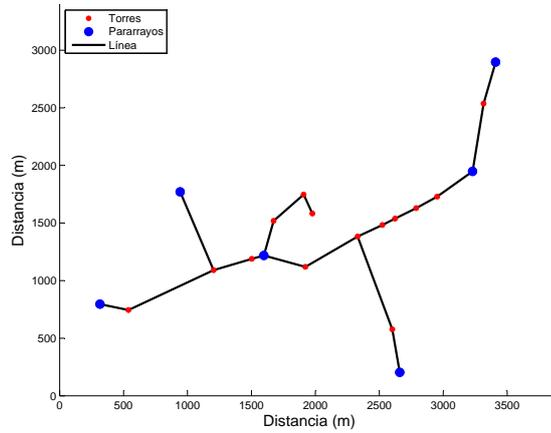
Figura 8.4: Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (segunda ejecución). CFO constante

## 8.2. Línea con extremos abiertos y CFO no constante

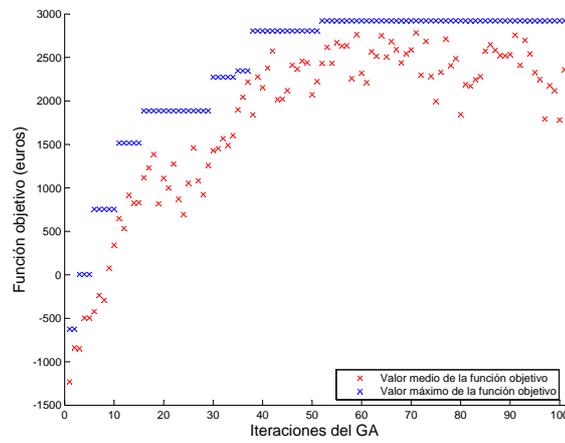
Tras verificar el funcionamiento correcto de la metodología en una red con extremos abiertos y CFO constante se procede a aplicar la metodología en una red con CFO no constante. En este caso, las torres T17, T18 y T19 tienen un CFO de 200 kV mientras que el CFO en el resto de torres es de 75 kV. Otra vez se ha ejecutado el GA dos veces para verificar el correcto funcionamiento y su independencia de las condiciones iniciales.

La Figura 8.5 muestra los resultados obtenidos de la misma forma que en el caso anterior. Como se puede ver, los pararrayos han sido colocados prácticamente en la misma ubicación, pero no se ha colocado el pararrayos de la rama con un CFO más elevado (ya que la probabilidad de contorneo es menor) y se ha trasladado a la siguiente torre con un CFO de 75 kV. Tras la evaluación de la función objetivo a partir de la tasa de contorneos se obtiene un beneficio de 3890 €. La Figura 8.6 muestra el resultado tras una segunda ejecución del GA donde se puede observar que el resultado es aproximadamente el mismo. El valor del beneficio en este caso es de 3571 €.

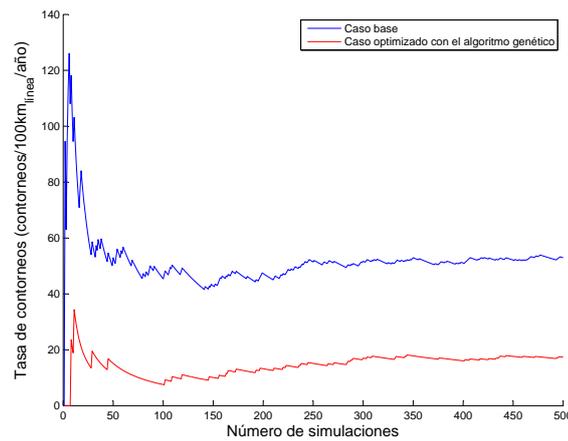
De los resultados obtenidos tanto para la red con un CFO constante como cuando el CFO cambia a lo largo de la red se puede concluir que la metodología funciona correctamente dando una buena solución aunque no necesariamente la óptima.



(a) Ubicación de los pararrayos tras la optimización

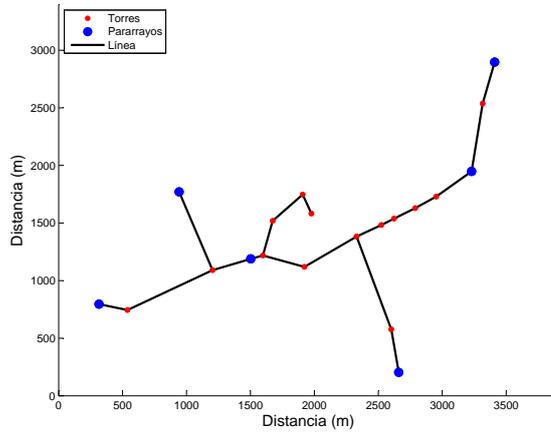


(b) Valores máximo y medio de la función objetivo a lo largo de las iteraciones

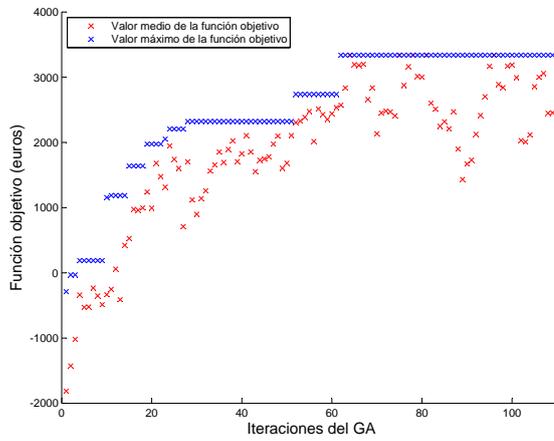


(c) Tasa de contorneos para el escenario base y para el caso optimizado calculada a partir de la metodología del capítulo 5 en función del número de rayos simulados

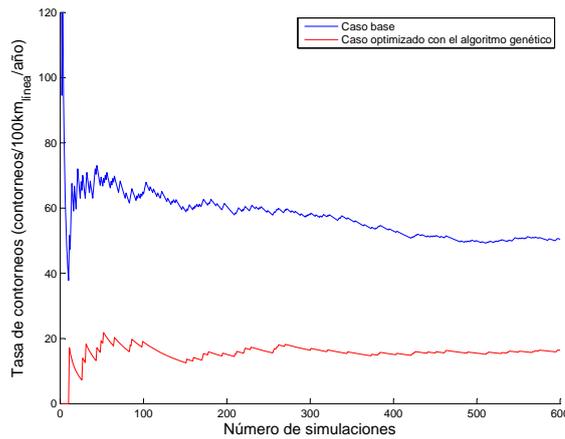
Figura 8.5: Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (primera ejecución). CFO no constante



(a) Ubicación de los pararrayos tras la optimización



(b) Valores máximo y medio de la función objetivo a lo largo de las iteraciones

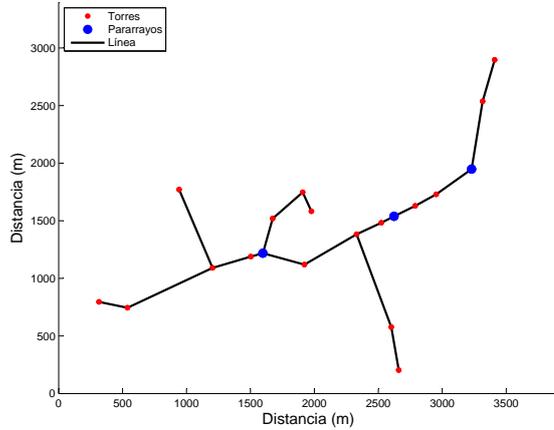


(c) Tasa de contorneos para el escenario base y para el caso optimizado calculada a partir de la metodología del capítulo 5 en función del número de rayos simulados

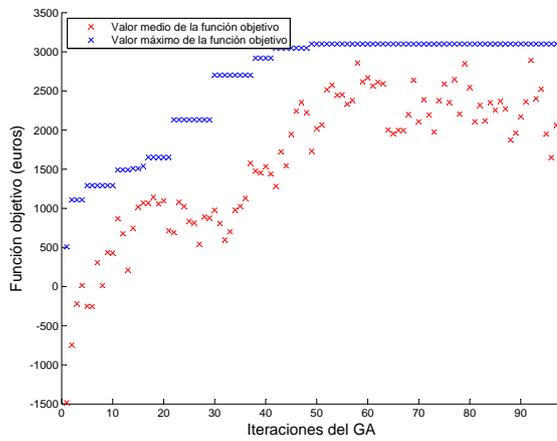
Figura 8.6: Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA (segunda ejecución). CFO no constante

### 8.3. Línea con impedancia característica en extremos

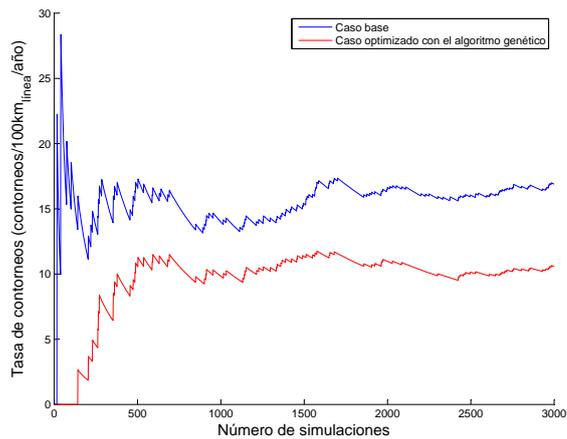
Una vez se ha visto que la metodología propuesta funciona correctamente, se procede a aplicarla en un caso más real. La red de la Figura 8.1 tiene impedancias características en los extremos para evitar reflexiones (representando así una zona concreta de una red mayor). El CFO es constante y de 75 kV y la conductividad de 10 mS/m, la vida útil del pararrayos es de 40 años y la densidad de descargas es de  $N_g = 2$ . Los resultados se muestran en la Figura 8.7 siendo el valor del beneficio de 2184,1 €. Se observa que en este caso únicamente se han colocado 3 pararrayos y, curiosamente, dos de ellos en un tramo de línea poco ramificado. Este resultado puede ser interpretado a partir de las observaciones hechas en el capítulo 5.2 en el que se ha analizado el efecto de las ramificaciones concluyendo que éstas pueden contribuir a disminuir la magnitud de las sobretensiones. Adicionalmente se observa que con un número reducido de pararrayos se puede disminuir considerablemente el número de contorneos producidos en una red aérea de media tensión (en este caso 15,5 kV).



(a) Ubicación de los pararrayos tras la optimización



(b) Valores máximo y medio de la función objetivo a lo largo de las iteraciones



(c) Tasa de contorneos para el escenario base y para el caso optimizado calculada a partir de la metodología del capítulo 5 en función del número de rayos simulados

Figura 8.7: Análisis de los resultados obtenidos tras ejecutar el GA. Impedancia característica en extremos

## Conclusiones

Este proyecto tenía por objetivo diseñar una metodología para determinar el número y ubicación de pararrayos a instalar en una red de distribución según un criterio económico. Este objetivo ha sido cubierto satisfactoriamente detallando el procedimiento y los resultados en esta memoria. Para el desarrollo del proyecto se han realizado las siguientes tareas:

- Análisis del estado del arte en las protecciones contra sobretensiones producidas por rayos y métodos de cálculo de sobretensiones inducidas.
- Definición y caracterización de los parámetros más influyentes del rayo para poder realizar un estudio estadístico.
- Implementación de un método para automatizar las simulaciones con el fin de realizar un estudio estadístico de las tasas de contorno.
- Desarrollo de una metodología mediante algoritmos genéticos para la selección del número y ubicación de pararrayos a instalar en una red aérea de distribución y su aplicación a una red aérea de distribución.

Los resultados en el cálculo de las tasas de contorno en una línea de longitud infinita sugiere que las redes aéreas de distribución con CFO reducido pueden requerir sistemas de protección. Adicionalmente se ha comprobado la necesidad de tener en cuenta una forma aproximada (en doble rampa) de la corriente del rayo y no en forma de escalón como se ha realizado en muchos estudios y se ha visto que una mala conductividad del terreno tiende a aumentar la amplitud de las sobretensiones.

La metodología desarrollada ha aportado mejoras significativas respecto a otras propuestas como las realizadas en [12] o en [17] al ser capaz, no solo de ubicar un número concreto de pararrayos, sino también de determinar el número de pararrayos a instalar además de poder tener en cuenta un nivel de aislamiento diferente a lo largo de la red.

Respecto a la estructura de la red, las ramificaciones pueden tener un efecto favorable reduciendo las sobretensiones inducidas por rayos. En el caso de aplicación (cuando hay impedancias características en los extremos) se han ubicado más pararrayos en la zona menos ramificada. Este resultado contrasta con las recomendaciones de la norma IEEE Std. 1410-2010 [2] donde se sugiere que colocar pararrayos cada 300 m puede reducir significativamente el número de contorneos.

Finalmente, en términos generales, se puede concluir que la colocación de pararrayos en una red de distribución puede reducir la amplitud de las sobretensiones así como el número de contorneos en una red aérea de distribución. Las previsiones realizadas están hechas en base a datos meteorológicos históricos los cuales pueden cambiar mucho de un año para otro. En este sentido, los resultados pueden presentar diferencias significativas con la realidad por lo que deben interpretarse como lo que son: previsiones.

## Trabajos futuros

El trabajo realizado en este proyecto puede ser ampliado según las siguientes líneas de trabajo:

- Aplicación la metodología en redes multifásicas. En este caso resulta interesante estudiar también la efectividad de instalar pararrayos entre fases o entre fase y tierra tratando de encontrar la configuración óptima.
- Estudiar la efectividad del uso de pararrayos en función de la resistencia de puesta a tierra.
- Analizar más detalladamente como pueden afectar las ramificaciones en las sobretensiones inducidas por rayos y plantear la posibilidad de tener en cuenta este efecto en el diseño de nuevas redes.
- Realizar estudios específicos del coste económico de los contorneos pudiendo tener en cuenta, además de la energía no entregada, penalizaciones legales por interrupciones momentáneas.
- Ampliación del estudio para redes con cables de guarda así como el efecto de los objetos (edificios, árboles, etc.) próximos a la línea los cuales pueden atraer los rayos aumentando el número de descargas indirectas.

## Agradecimientos

Quisiera agradecer a Andreas Sumper, director del proyecto, por el seguimiento realizado así como sus consejos y sugerencias.

También agradezco a mis compañeros del CITCEA-UPC por las ayudas y aportaciones puntuales realizadas así como fomentar el interés por la innovación dentro de un gran ambiente de trabajo.

A Antoni Sudrià, director del CITCEA-UPC, por darme la oportunidad de iniciarme en el mundo de la investigación dentro del Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments.

A la Càtedra Endesa Red por la oportunidad de trabajar en proyectos innovadores sobre el transporte y distribución de energía eléctrica.

Finalmente, y de manera especial, agradezco a Mireia, a mis padres Mariona y Ramir y a mi hermano Ignasi por la paciencia y ayuda incondicional en momentos especialmente difíciles durante el transcurso de la carrera y del proyecto.



## Apéndice A

# Presupuesto

### A.1. Introducción

En esta sección se presenta el presupuesto del proyecto. Este es un proyecto de simulación y programación por lo que los elementos de infraestructura necesaria son los típicos de una oficina.

### A.2. Presupuesto para el proyecto de protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas a tierra mediante pararrayos en líneas aéreas de media tensión

El presupuesto de este proyecto se encuentra desglosado en dos partidas: herramientas informáticas (hardware y software) y mano de obra. Los precios en estas partidas no tienen en cuenta el IVA, que se aplica al final al agregar los dos conceptos.

#### A.2.1. Material informático

La Tabla A.1 muestra el presupuesto destinado al material informático utilizados en este proyecto. Respecto al hardware se presenta el modelo de ordenador y monitor utilizados. Respecto al software, la licencia del programa MATLAB ©(el programa de simulación EMTP-ATP es de carácter libre).

Concepto	Precio/unidad	Unidades	total
Ordenador HP Compaq Pro 4300	555,39 €	0,25	138,85 €
Monitor HP Compaq LE2202x	156,09 €	0,25	39,02 €
MATLAB ©	6.000,00 €	0.5	3.000,00 €
<b>Total</b>			<b>3.177,87 €</b>

Tabla A.1: Presupuesto del material informático

### A.2.2. Presupuesto de la mano de obra

El presupuesto del proyecto en concepto de la mano de obra se muestra en la Tabla A.2.

Concepto	Precio/hora	Horas	total
Investigación y desarrollo	35 €	220	7.700,00 €
Programación	35 €	200	7.000,00 €
Redacción	35 €	190	6.650,00 €
<b>Total</b>		610	21.350,00 €

Tabla A.2: Presupuesto de la mano de obra

### A.2.3. Suma por capítulos

La Tabla A.3 muestra el presupuesto total del proyecto.

Capítulo	Precio
Material informático	3.177,87 €
Mano de obra	21.350,00 €
Subtotal	24.527,87 €
Costes operativos (10 % del subtotal)	2.452,79 €
Total	26.980,66 €
IVA (21 %)	5.665,94 €
<b>Total</b>	32.646,60 €

Tabla A.3: Presupuesto total del proyecto

La validez del presupuesto es de 3 meses a partir de la fecha de la firma.

**Fecha:** 30 de enero de 2013

**Firma:** Eduard Bullich Massagué

## Apéndice B

# Impacto ambiental

En este proyecto se ha desarrollado una metodología para la ubicación óptima de pararrayos. Todos los resultados obtenidos han sido a nivel de estudio y simulación por lo que no se ha fabricado, comprado o instalado ningún pararrayos. Por esta razón, el impacto ambiental del proyecto es relativamente bajo y está asociado en la utilización de un espacio urbano edificado (oficina) así como los servicios asociados y el consumo energético tanto de los equipos utilizados como de iluminación y climatización.

A continuación se exponen los aspectos asociados al impacto ambiental de la fabricación, instalación y operación de los pararrayos.

### B.1. Impacto en la fabricación e instalación de pararrayos

Cuantificar el impacto ambiental que supone la fabricación de los componentes de los pararrayos de ZnO resulta extenso y complicado. La obtención, el tratamiento o el reciclaje de los materiales de los pararrayos como el ZnO (40 % de la masa total), o los materiales cerámicos o poliméricos de la envolvente (22,6 % de la masa total) así como los materiales metálicos como el acero inoxidable o aluminio (16 % de la masa total) representan un elevado consumo energético, consumo y contaminación de agua y una degradación de la capa de ozono [19]. Por otro lado, el elevado impacto de la fabricación contrasta con la elevada vida útil que suele estar entre los 30 y 40 años y los grandes beneficios de instalar pararrayos.

Respecto a la instalación, cabe destacar que no supone un gran impacto visual debido a su tamaño y su relación con el tamaño de las torres de las líneas aéreas de media tensión. Por otro lado, para que los pararrayos sean efectivos, estos deben ir puestos a tierra. Cuando la puesta a tierra es independiente de la de la torre, se debe tener en cuenta el impacto de la perforación del terreno para colocar los electrodos de puesta a tierra el cual puede ser un impacto ambiental por la modificación del terreno o un impacto acústico en las tareas de instalación así como el impacto de la fabricación de los materiales requeridos para la puesta a tierra.

## B.2. Impacto en la explotación

El uso de pararrayos en redes aéreas de distribución aporta, en general, un efecto positivo en el impacto ambiental. Aunque exista un impacto en su fabricación e instalación, en la explotación el pararrayos conseguirá reducir las magnitudes de las sobretensiones que puedan aparecer en la red alargando así la vida útil de los elementos que la conforman evitando reparaciones y recambios de los elementos de la red.

## Apéndice C

# Resolución del modelo Agrawal para la implementación en EMTP-ATP

La resolución de las ecuaciones del modelo Agrawal se puede realizar mediante el método de las características.

Partiendo de las ecuaciones del modelo Agrawal (C.1) y (C.2), suponiendo que el campo electromagnético se propaga homogéneamente por la línea sin pérdidas a una velocidad constante, éste método trata de transformar las ecuaciones en derivadas parciales en ecuaciones diferenciales ordinarias. Estas, contienen la información de la propagación de la onda incidente y reflejada. Así pues, las ecuaciones (C.3) y (C.4) definen las curvas características hacia adelante y hacia atrás.

$$\frac{\partial u^s(x, t)}{\partial x} + L' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = E_x^i(x, h, t) \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + C' \cdot \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (\text{C.2})$$

$$v_{c1} = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (\text{C.3})$$

$$v_{c2} = \frac{dx}{dt} = -\frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (\text{C.4})$$

Aplicando la regla de la cadena, se puede expresar las derivadas de  $u^s(x, t)$  y  $i(x, t)$  como (C.5) y (C.6).

$$du^s(x, t) = \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} \cdot dt \quad (\text{C.5})$$

$$di(x, t) = \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \cdot dt \quad (\text{C.6})$$

De (C.1) y (C.5) se obtiene la ecuación (C.7) y de (C.2) y (C.6) se obtiene la ecuación (C.8).

$$du^s(x, t) = \left( E_x^i(x, h, t) - L' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \right) dx + \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} dt \quad (\text{C.7})$$

$$di(x, t) = -C' \cdot \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} dx + \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} dt \quad (\text{C.8})$$

Teniendo en cuenta la característica hacia adelante, (C.3), se pueden reescribir estas ecuaciones como (C.9) y (C.10) siendo  $Z_c$  la impedancia característica de la línea.

$$du^s(x, t) = \left( E_x^i(x, h, t) \cdot v_{c1} - Z_c \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \right) dt + \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} dt \quad (\text{C.9})$$

$$di(x, t) = \left( -\frac{1}{Z_c} \cdot \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \right) dt \quad (\text{C.10})$$

Haciendo (C.9) +  $Z_c \cdot$  (C.10) se obtiene (C.11)

$$du^s(x, t) + Z_c \cdot di(x, t) = E_x^i(x, h, t) \cdot v_{c1} dt = E_x^i(x, h, t) dx \quad (\text{C.11})$$

Integrando esta última ecuación entre  $x_b$  y  $x_a$ , (C.12), se obtiene (C.13) que si se ordena adecuadamente se llega a (C.14).

$$\int_{x_b}^{x_a} \left( \frac{du^s(x, t)}{dx} + Z_c \cdot \frac{di(x, t)}{dx} \right) dx = \int_{x_b}^{x_a} E_x^i(x, h, t) dx \quad (\text{C.12})$$

$$u^s(x_a, t) - u^s(x_b, t - \tau) + Z_c \cdot i(x_a, t) - Z_c \cdot i(x_b, t - \tau) = \int_{x_b}^{x_a} E_x^i(x, h, t) dx \quad (\text{C.13})$$

$$u^s(x_a, t) = -Z_c \cdot i(x_a, t) + u^s(x_b, t - \tau) + Z_c \cdot i(x_b, t - \tau) + \int_{x_b}^{x_a} E_x^i(x, h, t) dx \quad (\text{C.14})$$

Análogamente, para la característica hacia atrás se obtiene (C.15).

$$u^s(x_b, t) = Z_c \cdot i(x_b, t) + u^s(x_a, t - \tau) - Z_c \cdot i(x_a, t - \tau) - \int_{x_b}^{x_a} E_x^i(x, h, t) dx \quad (\text{C.15})$$

Estas dos ecuaciones pueden ser transformada en términos de la tensión total teniendo en cuenta (C.16) obteniendo las ecuaciones (C.17) y (C.18)

$$u^s(x, t) = u(x, t) - u^i(x, t) = u(x, t) + \int_0^h E_z^i(x, z, t) dz \quad (\text{C.16})$$

$$u(x_a, t) = -Z_c \cdot i(x_a, t) + u_{ra}(t) \quad (\text{C.17})$$

$$u(x_b, t) = Z_c \cdot i(x_b, t) + u_{rb}(t) \quad (\text{C.18})$$

donde

$$u_{ra}(t) = u(x_b, t - \tau) + Z_c \cdot i(x_b, t - \tau) + \int_{x_b}^{x_a} E_x^i(x, h, t) dx + \int_{x_b}^{x_a} (E_z^i(x_b, z, t - \tau) - E_z^i(x_a, z, t)) dz$$

$$u_{rb}(t) = u(x_a, t - \tau) - Z_c \cdot i(x_a, t - \tau) - \int_{x_b}^{x_a} E_x^i(x, h, t) dx + \int_{x_b}^{x_a} (E_z^i(x_a, z, t - \tau) - E_z^i(x_b, z, t)) dz$$

El esquema equivalente se muestra en la Figura C.1. Las dos fuentes de tensión serán controladas desde el lenguaje MODELS del EMTP-ATP mediante fuentes de tensión TAC.

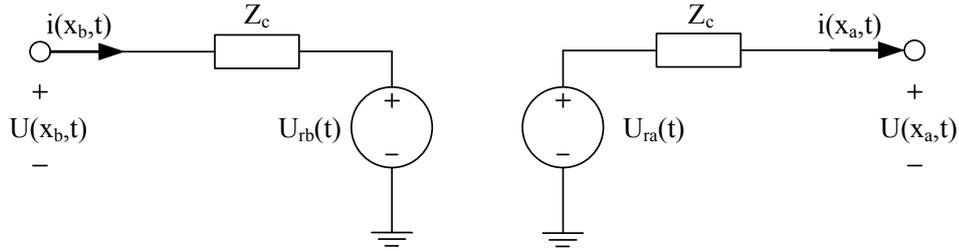


Figura C.1: Esquema equivalente del modelo implementado en el EMTP-ATP para el cómputo de sobretensiones inducidas por descargas indirectas

La implementación del programa se ha realizado en [5], dónde se calculan las ecuaciones del campo eléctrico con conductividad infinita a partir de las ecuaciones analíticas introducidas por Rusck utilizando el modelo TL para la corriente de retorno. La metodología de rusck supone la corriente de retorno como un escalón. Pero mediante una convolución se logra obtener una solución para una forma de onda en doble rampa. Por otro lado, el efecto de la conductividad del terreno es introducido mediante la aproximación de Cooray-Rubinstein como se explica en [5].



## Apéndice D

# Determinación del paso de integración en el EMTP-ATP

Un aspecto importante al realizar las simulaciones es determinar el paso de integración,  $\Delta t$ . Primeramente, debido que para el computo en un instante de tiempo,  $t$  se requieren los valores en el instante  $t - \tau$ , siendo  $\tau$  el tiempo de propagación de las ondas, se deduce que  $\Delta t$  debe ser menor que  $\tau$ . El tiempo de propagación de la onda se calcula como (D.1). Por lo que, teniendo en cuenta que la longitud del vano más corto en el caso del capítulo 7 es de 99 m, el paso de integración debe ser menor que  $0,33 \mu\text{s}$  para poder realizar el cómputo (aunque usualmente se toma como referencia el valor de  $\tau/2$  [20] lo que supondría un paso de integración de  $0,165 \mu\text{s}$ ).

$$\tau = l/c \quad (\text{D.1})$$

Donde

$l$  Longitud del vano en m

$c$  Velocidad de la luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

Por otro lado, aunque con un  $\Delta t = 0,33 \mu\text{s}$  es posible realizar la simulación, pueden aparecer errores por el hecho de trabajar en tiempo discreto por lo que se realiza un análisis del paso de integración. Para ello, se realiza el análisis para una línea con 4 vanos de línea y cuatro configuraciones distintas. La línea tiene una altura de 10 m y el terreno una conductividad de 0,001 S/m. El rayo impacta a 200 m de la línea perpendicular al punto medio según la Figura D.1 y sus características se muestran en la Tabla D.1. En la primera configuración, la longitud del vano es de 300 m con una impedancia característica conectada en los extremos para evitar reflexiones. En la segunda configuración, la longitud del vano de línea se mantiene en 300 m pero se dejan los extremos abiertos para analizar si la aparición de reflexiones puede afectar a los resultados. Las configuraciones 3 y 4 son las mismas que la 1 y la 2 pero con una longitud del vano de 90 m para ver cómo puede afectar el resultado con distancias de vano distintas. Los resultados se muestran en las Figuras D.2, D.3, D.4 y D.5 donde se muestra las tensiones en los puntos n1, n2 y n3 según el paso de integración (por simetría n4 equivale a n2 y n5 a n1).

Se puede observar como para un  $\Delta t = 0,3 \mu\text{s}$  la sobretensión es menor que para los otros pasos de integración. En cuanto al caso de  $\Delta t = 0,2 \mu\text{s}$  se aproxima bastante bien a los casos con paso de integración menor, pero en la Figura D.5 se observan diferencias en cuanto a la forma de la onda. Cuando el paso se reduce a  $\Delta t = 0,1 \mu\text{s}$  se obtiene prácticamente el mismo resultado que para un paso de  $\Delta t = 0,05 \mu\text{s}$  por lo que se da por válido un  $\Delta t = 0,1$ .

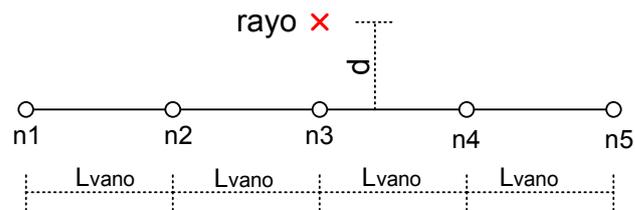
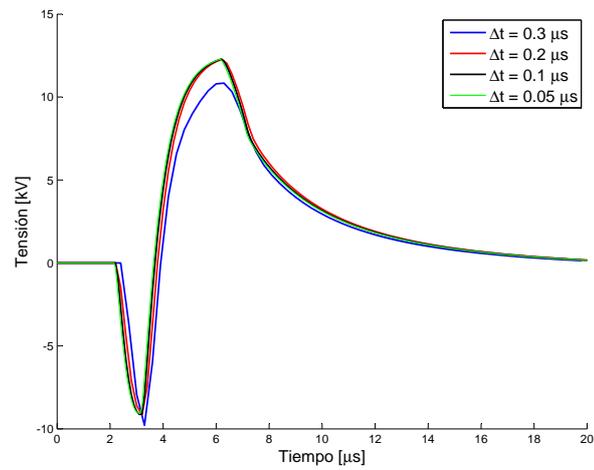


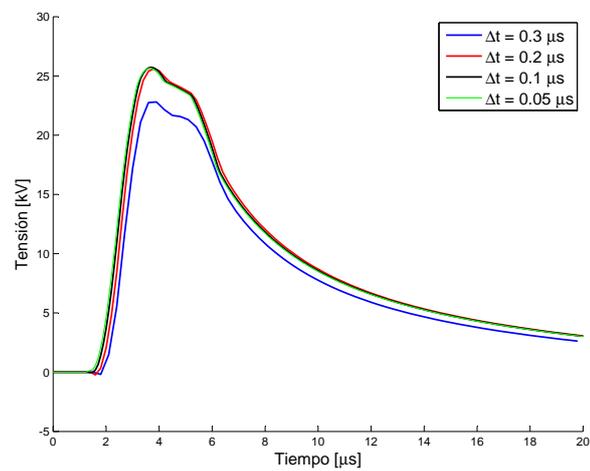
Figura D.1: Caída del rayo para el análisis del paso de integración

Parámetro	Valor
$I_c$	10 kA
$T_c$	1 $\mu$ s
$T_h$	50 $\mu$ s
$\nu$	$1,5 \cdot 10^8$ m/s
$d$	200 m

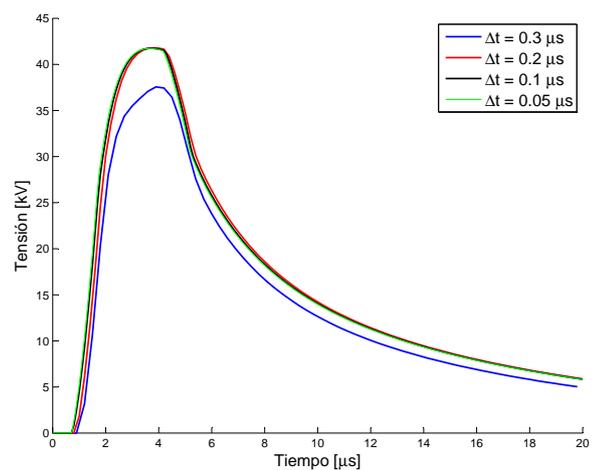
Tabla D.1: Parámetros del rayo



(a) Tensión en n1

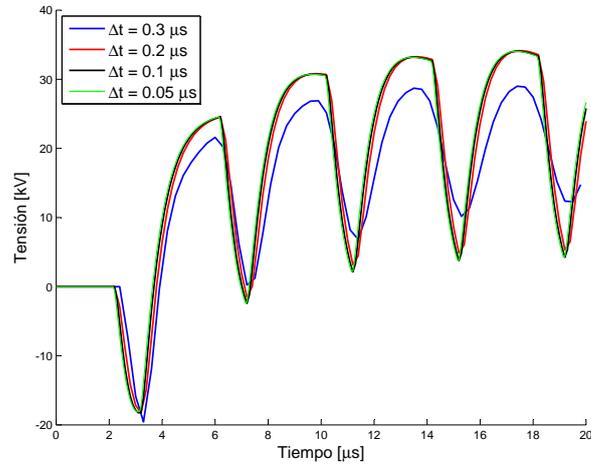


(b) Tensión en n2

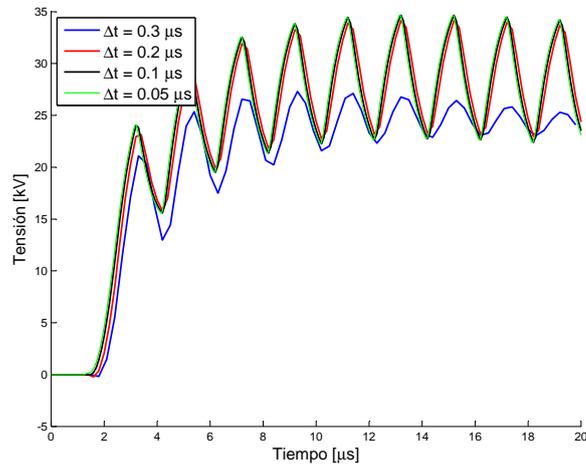


(c) Tensión en n3

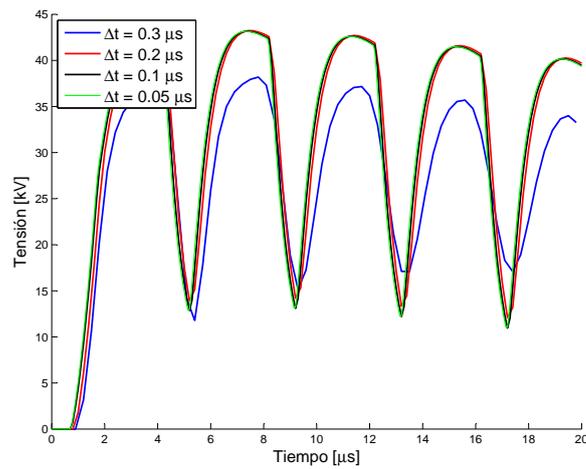
Figura D.2: Análisis del paso de integración. Configuración 1



(a) Tensión en n1

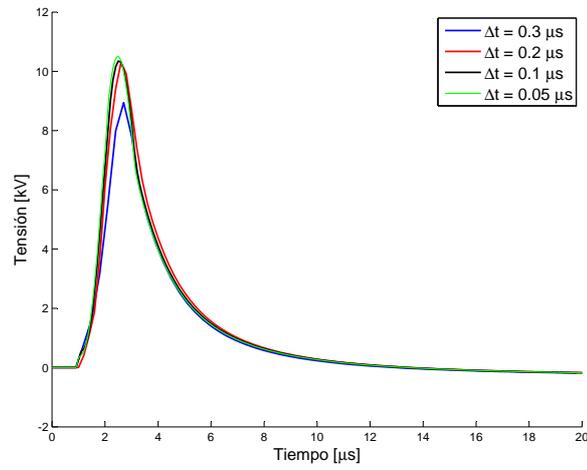


(b) Tensión en n2

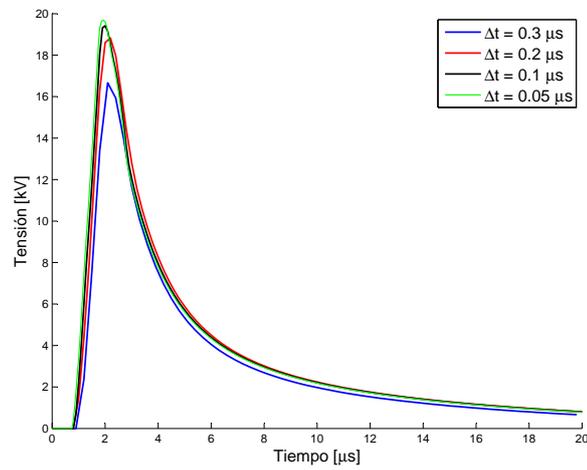


(c) Tensión en n3

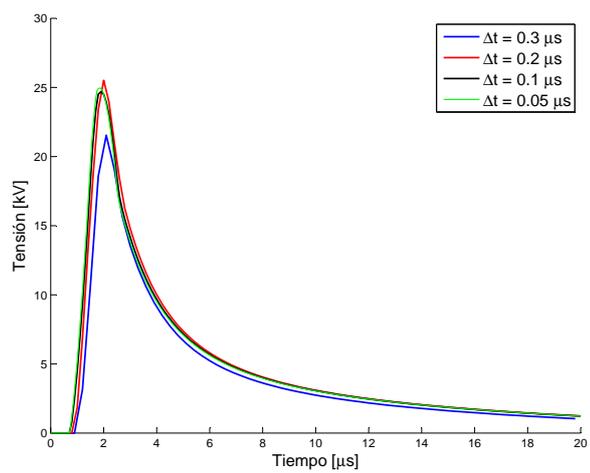
Figura D.3: Análisis del paso de integración. Configuración 2



(a) Tensión en n1

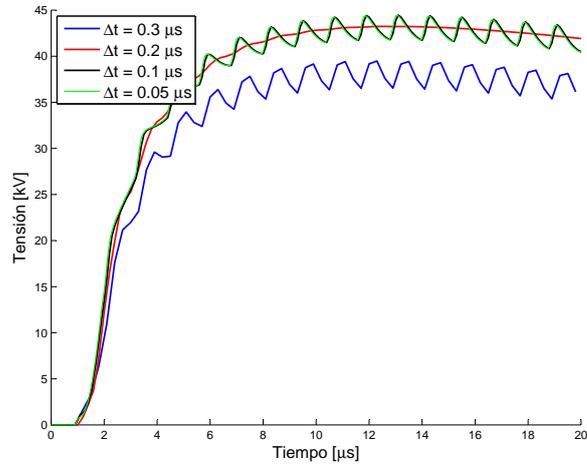


(b) Tensión en n2

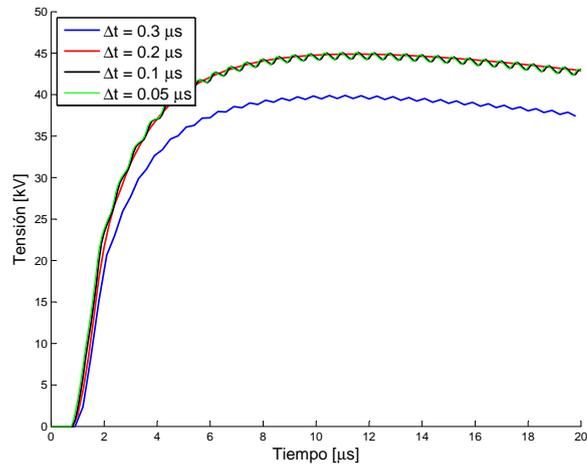


(c) Tensión en n3

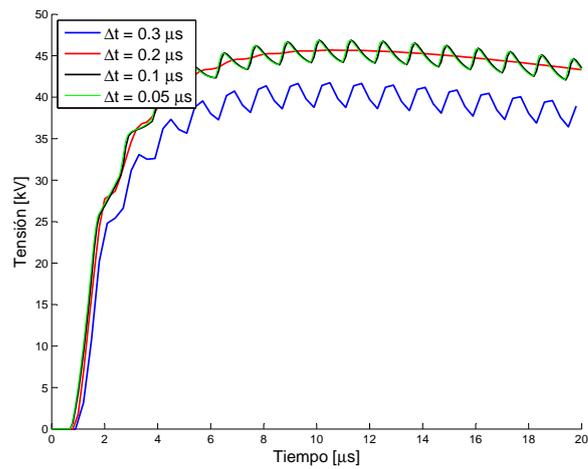
Figura D.4: Análisis del paso de integración. Configuración 3



(a) Tensión en n1



(b) Tensión en n2



(c) Tensión en n3

Figura D.5: Análisis del paso de integración. Configuración 4

## Bibliografía

- [1] Cigré working group 33.01. *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, Octubre 1991. [17](#), [27](#), [31](#)
- [2] IEEE Working group on the lightning performance of distribution lines. *IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*, Enero 2011. [17](#), [18](#), [31](#), [39](#), [40](#), [44](#), [56](#), [62](#), [75](#)
- [3] Juan A. Martínez Velasco y Ferley Castro Aranda. Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. parte ii: cálculo estadístico de sobretensiones. *Revista Iberoamericana del ATP*, 4, Octubre 2002. [17](#)
- [4] Francisco González Molina. *Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2001. [17](#), [31](#)
- [5] Hans Kristian Høidalen. Analytical formulation of lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 45(1), Febrero 2003. [17](#), [22](#), [35](#), [65](#), [85](#)
- [6] IEEE Working group on the lightning performance of distribution Lines. *IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*, Enero 2004. [18](#)
- [7] Cigré working group c4.4.02. *Protection of MV and LV networks against lightning. Part 1: common topics*, Febrero 2006. [18](#)
- [8] Vladimir A. Rakov y Martin A. Uman. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 40(4), Noviembre 1998. [19](#)
- [9] Marcos Rubinstein y Martin A. Uman. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole, revisited. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 33(4), Noviembre 1991. [20](#)
- [10] Hans Kristian Høidalen. Calculation of lightning-induced overvoltages using models. [22](#)
- [11] C.A.Nucci y F.Rachidi M.Paolone. A new difference time domain scheme for the evaluation of lightning induced overvoltages on multiconductor overhead lines. [22](#), [44](#)
- [12] Ernesto Pérez Gonzalez. *Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2006. [22](#), [65](#), [75](#)
- [13] Horacio Torres Sánchez. *El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. 2002. [26](#)

- [14] L. Grigsby. *The Electric Power Engineering Handbook*. 28
- [15] P. Pinceti y M. Giannettoni. A simplified model for zinc oxide surge arresters. 14(2), Abril. 49
- [16] T Alander, J, editor. *On optimal population size of genetic algorithms*. Proceedings CompEuro 1992, Computer systems and software engineering. 54
- [17] Santiago Bogarra Rodríguez y Ma. Àngela Grau Gotés Ángel L. Orille-Fernández. Optimization of surge arresters location. *IEEE Transactions on power delivery*, 19(1), Enero 2004. 66, 75
- [18] Pedro Linares y Luis Rey. The costs of electricity interruptions in Spain. are we sending the right signals? 66
- [19] Caroline Subreville-Auzet y Ramón Puyamé Mehrdad Hassanzadeh, Frédéric Malpiece. Global impact assessment of an optimised environmentally friendly lightning arrester. 81
- [20] Antonio Gómez Expósito. *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. 2002. 87