
Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL RAYO. PARÁMETROS	5
3.1. PROCESO DE DESCARGA DE UNA NUBE	5
3.2. FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE UN RAYO	7
3.3. FUNCIONES DE PROBABILIDAD PARA LA CORRIENTE MÁXIMA DE UN RAYO	9
3.3.1. Función densidad de probabilidad	9
3.3.2. Función de distribución acumulada	9
3.4. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD PARA EL TIEMPO DE FRENTE DE LA ONDA DE CORRIENTE DE UN RAYO	11
3.4.1. Función densidad de probabilidad	11
3.5. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD CONJUNTA PARA LA CORRIENTE Y EL TIEMPO DE FRENTE DE UN RAYO	11
3.5.1. Función densidad de probabilidad	11
3.6. DATOS REPRESENTATIVOS DE UN RAYO	15
3.7. DENSIDAD DE DESCARGAS	15
3.8. VELOCIDAD DE RETORNO DEL RAYO	16
4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN FRENTE AL RAYO	17
4.1. INTRODUCCIÓN	17
4.2. MODELO ELECTROGEOMÉTRICO	18
4.3. SOBRETENSIONES ORIGINADAS POR RAYOS	22
4.3.1. Introducción	22

4.3.2. Sobretensiones originadas por rayos directos	22
4.3.2.1. Impacto en un conductor de fase	22
4.3.2.2. Impacto en un conductor de tierra	23
4.3.3. Sobretensiones originadas por rayos a tierra	26
4.3.3.1. Fórmula de Rusck	26
4.3.3.2. Método de Chowdhuri	27
4.3.3.2.1. Modelo de Chowdhuri	27
4.3.3.2.2. Cálculo de Sobretensiones	32
4.4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO	37
4.4.1. Introducción	37
4.4.2. Estudio paramétrico en líneas sin cable de tierra	38
4.4.2.1. Fórmula de Rusck	38
4.4.2.2. Método de Chowdhuri	41
4.4.3. Estudio paramétrico en líneas con cable de tierra	45
4.4.3.1. Fórmula de Rusck	45
4.4.3.2. Método de Chowdhuri	50
4.5. CÁLCULO DE SOBRETENSIONES MEDIANTE EMTP/ATP	54
4.5.1. Introducción	54
4.5.2. Sobretensiones originadas por rayos directos	54
4.5.3. Sobretensiones originadas por rayos a tierra	56
4.5.3.1. Cálculo de sobretensiones	56
4.5.3.2. Validación del modelo	63
5. CÁLCULO DE LA TASA DE CONTORNEAMIENTOS EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN	111
5.1. INTRODUCCIÓN	111
5.2. CÁLCULO SISTEMÁTICO	112
5.2.1. Introducción	112
5.2.2. Líneas sin cable de tierra	112
5.2.2.1. Método 1	112
5.2.2.2. Método 2	115
5.2.2.3. Método 3	118
5.2.3. Líneas con cable de tierra	119
5.2.3.1. Método 1	119

5.2.3.2. Método 2	120
5.2.3.3. Método 3	122
5.2.4. Resumen de métodos	124
5.2.5. Resultados	125
5.2.5.1. Tasa de contorneamientos con velocidad de retorno del rayo constante	125
5.2.5.2. Tasa de contorneamientos con velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad	126
5.3. CÁLCULO ESTADÍSTICO	131
5.3.1. El método de Monte Carlo	131
5.3.2. Cálculo estadístico con una tensión de contorneamiento constante	132
5.3.3. Cálculo estadístico en función de la tensión de contorneamiento	133
6. APLICACIÓN DE REDES NEURONALES EN EL CÁLCULO DE SOBRETENSIONES Y TASA DE CONTORNEAMIENTOS	141
6.1. INTRODUCCIÓN	141
6.2. INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES	142
6.2.1. Conceptos generales	142
6.2.1.1. Definición	142
6.2.1.2. Aplicaciones	143
6.2.1.3. Tipos de redes neuronales en el reconocimiento de patrones	144
6.2.1.4. Elementos de una red neuronal	145
6.2.1.5. Estructura de una red neuronal artificial	145
6.2.1.6. Características de las redes neuronales artificiales	145
6.2.2. Modelo de red neuronal Backpropagation	148
6.2.2.1. Introducción	148
6.2.2.2. Proceso de aprendizaje de la red neuronal	149
6.2.2.2.1. Algoritmo de entrenamiento	149
6.2.2.2.2. Variables significativas del entrenamiento	151
6.2.2.2.3. Técnicas para la mejora del entrenamiento	153
6.2.2.3. Proceso de validación de la red neuronal	159
6.3. ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES EN EL CÁLCULO DE SOBRETENSIONES POR RAYOS	160
6.3.1. Introducción	160
6.3.2. Clasificador de descargas. Líneas sin cable de tierra	161
6.3.3. Cálculo de sobretensiones en líneas sin cable de tierra. Velocidad de retorno del rayo con distribución uniforme	168

6.3.3.1. Método de Rusck	168
6.3.3.2. Método de Chowdhuri	178
6.3.4. Cálculo de sobretensiones en líneas con cable de tierra. Velocidad de retorno del rayo con distribución uniforme	187
6.3.4.1. Método de Rusck	187
6.3.4.2. Método de Chowdhuri	198
6.3.5. Cálculo de sobretensiones en líneas sin cable de tierra. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad máxima	205
6.3.5.1. Método de Rusck	205
6.3.5.2. Método de Chowdhuri	212
6.3.6. Cálculo de sobretensiones en líneas con cable de tierra. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad máxima	219
6.3.6.1. Método de Rusck	219
6.3.6.2. Método de Chowdhuri	226
6.4. APLICACIÓN DE REDES NEURONALES EN EL CÁLCULO DE LA TASA DE CONTORNEAMIENTOS	233
6.4.1. Introducción	233
6.4.2. Velocidad de retorno del rayo con distribución uniforme	233
6.4.3. Velocidad de retorno del rayo en función de la intensidad máxima	234
6.4.4. Cálculo estadístico en función de la tensión de contorneamiento	236
7. CONCLUSIONES	279
8. BIBLIOGRAFÍA	285
ANEXO A. PROGRAMA CGTI	293
ANEXO B. PROGRAMA ELARD	303
ANEXO C. LISTA DE SÍMBOLOS	311