



**EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN
ESP**

Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización
y Laboratorios

GM-08

Guía Metodológica: Análisis del nivel de riesgo por rayos

EPM-UCET-NYL-GM-08

Agosto 2019

Elaboración, Revisión y Aprobación

Actividad	Tema	Nombre
Elaboró	Guía Metodológica: Análisis del nivel de riesgo por rayos	Consultoría Colombiana S.A
	Revisó	José Daniel Acosta Moreno
	Aprobó	Mónica Rueda Aguilar

Requeridores

Destinatario	Cargo	No. de Copias
Johan Sebastián Higuera Higuera	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería	1
Gabriel Jaime Romero Choperena	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería	1

Revisiones

Revisión	Fecha dd/mm/aaaa	Descripción de la revisión
01	23/08/2019	Versión inicial

© Copyright: Empresas Públicas de Medellín ESP. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados.

CONTENIDO

1	OBJETO	7
2	ALCANCE.....	8
3	DOCUMENTOS DE LA REFERENCIA	9
4	DEFINICIONES	10
5	CONSIDERACIONES GENERALES	11
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	11
5.2	NÚMERO MÁXIMO DE SALIDAS PERMITIDAS.....	11
5.3	CÁLCULO DEL CFO DE LAS ESTRUCTURAS	11
5.4	EJEMPLO DE CÁLCULO DEL CFO _{TOTAL} DE UNA ESTRUCTURA	14
6	DESEMPEÑO DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	18
6.1	SALIDAS DEBIDAS A DESCARGAS ATMOSFERICAS DIRECTAS	18
6.2	SALIDAS DEBIDAS A DESCARGAS ATMOSFERICAS INDIRECTAS	20
6.2.1	Método detallado para el cálculo de las salidas debidas a descargas indirectas	20
6.2.2	Método simplificado para el cálculo de las salidas debidas a descargas indirectas.	22
6.2.3	EJEMPLO DE CÁLCULO DE LAS SALIDAS POR DESCARGAS INDIRECTAS A PARTIR DE LA FIGURA 7.....	23
6.3	MEDIDAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	24
6.3.1	Incremento del CFO de las estructuras	25
6.3.2	Optimización del desempeño de las estructuras ante descargas atmosféricas mediante instalación de descargadores de sobretensión (DPS)	26
6.3.3	Instalar cables de guarda	31
6.3.4	Cable de guarda junto con dispositivos de protección contra sobretensión (DPS) 35	
6.3.5	Mejorar los valores de resistencia de puesta a tierra	35
6.4	EJEMPLO: DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A 44 KV UBICADO EN PUERTO BERRÍO, ANTIOQUIA.	36
6.4.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	36
6.4.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA	36
6.4.3	CÁLCULO DEL NIVEL DE AISLAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS.....	38
6.4.4	FLAMEOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRECTAS	41

6.4.5	FLAMEOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRECTAS.....	43
6.4.6	FLAMEOS TOTALES PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 44	
6.4.7	MEDIDAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	45
7	ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tensión de flameo crítico del aislamiento primario y CFO adicional aportado por los aislamientos complementarios [4].....	13
Tabla 2 Posibles rutas por las que la corriente de rayo podría provocar flameo.....	39
Tabla 3 CFO _{total} de la estructura NC-RA1-103	41
Tabla 4 CFO _{total} de la estructura NC-RA1-103 con mejora 1	46
Tabla 5 Interpolación para cálculo de flameo por descargas directas mejora 1.....	47
Tabla 6 Interpolación para cálculo de flameo por descargas directas mejora 2.....	50
Tabla 7 Valores límite del radio de la esfera rodante de acuerdo con el nivel de protección [2]	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cálculo de CFO_{total} de una estructura.....	14
Figura 2 Caminos para una eventual corriente de rayo.....	15
Figura 3 CFO para arreglos de cadenas de aisladores.....	16
Figura 4 Zonas de apantallamiento [7].....	19
Figura 5 Factor de apantallamiento S_f para objetos de diferentes alturas cercanos a una línea de distribución de 10 m [4].....	19
Figura 6 Descripción de los parámetros del impulso tipo rayo [3].....	21
Figura 7 Número de flameos por sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas indirectas [4].....	23
Figura 8 Ejemplo de cálculo de salidas por descargas indirectas [3].....	24
Figura 9 Porcentaje de descargas atmosféricas que causan flameo en función de la separación de los DPS [4].....	27
Figura 10 Ejemplo del cálculo de salidas por descargas directas instalando DPS cada 4 estructuras.....	28
Figura 11 Flameos por descargas indirectas en función de la separación entre DPS [4].	29
Figura 12 Ejemplo del cálculo de salidas por descargas indirectas instalando DPS cada 4 estructuras.....	30
Figura 13 Ángulo de apantallamiento en redes de distribución [4].....	32
Figura 14 Efecto de la resistencia de puesta a tierra en el rendimiento de cables de guarda.....	33
Figura 15 Ejemplo del cálculo de salidas por descargas directas instalando cable de guarda.....	34
Figura 16 Estructura en delta con cruceta de 1500mm de retención NC-RA1-103.	37
Figura 17 Aislador clase ANSI 52-4 Gamma.....	38
Figura 18 Aislador clase ANSI 57-2 Gamma.....	38
Figura 19 Ángulo de apantallamiento de la estructura NC-RA1-103.....	42
Figura 20 Porcentaje de descargas directas que causan flameo en la estructura NC-RA1-103.	43
Figura 21 Flameo por descargas indirectas en la estructura NC-RA1-103.....	44
Figura 22 Aislador clase ANSI 51-4F Gamma.....	45
Figura 23 Porcentaje de descargas directas que causan flameo en la estructura NC-RA1-103 mejora 1.....	47
Figura 24 Flameo por descargas indirectas en la estructura NC-RA1-103 mejora 1.....	48
Figura 25 Porcentaje de descargas directas que causan flameo en la estructura NC-RA1-103 mejora 2.....	50
Figura 26 Método de las esferas rodantes [2].....	54

1 OBJETO

Presentar los lineamientos para realizar la evaluación del nivel de riesgo por descargas eléctricas atmosféricas y las medidas para mitigar su efecto en las redes de distribución del grupo EPM, así como mostrar el procedimiento del diseño de sistemas de protección contra rayos.

2 ALCANCE

La presente guía metodológica está enfocada en desarrollar los tópicos del Sistema Integral de Protección contra Rayos para los elementos del sistema de distribución de energía del grupo EPM. Adicionalmente, se presentan los procedimientos a seguir en edificaciones y redes de energía.

Así mismo, se suministran los requerimientos normativos descritos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) [1] e internacionales como la IEEE 1312 [3] y IEEE 1410 [4], entre otras.

3 DOCUMENTOS DE LA REFERENCIA

- [1] Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. 2013.
- [2] ICONTEC, NTC 4552 – Protección contra descargas atmosféricas (rayos).
- [3] IEEE, IEEE 1313.2-1999 – Guide for the application of insulation coordination.
- [4] IEEE, IEEE 1410-2010- Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines.
- [5] ENERSIS, Convergencia de criterios de diseño redes de media tensión, 2002.
- [6] NT-12A Norma técnica: parámetros meteorológicos para el diseño de redes de distribución del Grupo EPM. Grupo EPM, 2019.
- [7] Ramírez Castaño, Samuel., “Redes de distribución de energía”, Universidad Nacional de Colombia, Tercera edición.
- [8] Nucci, C. A., Mazzetti, C. Rachidi, F., and Ianoz, M., “On lightning return stroke models for LEMP calculations,” 19th International Conference on Lightning Protection, Graz/Austria ,1988.
- [9] Uman, M. A., McLain, D. K. and Krider, E.P., “The electromagnetic radiation from a finite antenna,” American Journal of Physics, vol. 43, pp. 33-38, Jan. 1975.
- [10] Cooray, V., “Some consideration on the ‘Cooray-Rubinstein’ approximation used in deriving the horizontal electric field over finitely conducting ground”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 4, pp. 560 – 566, Nov 2002.
- [12] Rubinstein, M., “An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, pp. 531-535, Aug. 1996.

4 DEFINICIONES

Análisis de riesgo: conjunto de técnicas para identificar, clasificar y evaluar los factores de riesgo. Es el estudio de consecuencias nocivas o perjudiciales, vinculadas a exposiciones reales o potenciales [1].

Cable de guarda: cable metálico usado para reducir daños físicos debidos a descargas sobre las redes de energía [2].

Densidad promedio de descargas a tierra DDT: es la cantidad de descargas atmosféricas nube a tierra por unidad de área por unidad de tiempo; generalmente, la densidad de descargas atmosféricas a tierra está dada para un área de 1 km² durante un año [10].

Descarga atmosférica: es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de las nubes hacia la ionósfera [2].

Disrupción: falla de un aislamiento bajo un esfuerzo eléctrico, por superarse un nivel de tensión determinado que hace circular una corriente. Se aplica al rompimiento del dieléctrico en sólidos, líquidos o gases y a la combinación de estos [1].

Elemento de captación: parte de un Sistema Integral de Protección Contra Rayos (SIPRA), compuesto de elementos metálicos tales como bayonetas, conductores de acoplamiento o cables colgantes que interceptan intencionalmente el rayo [2].

Flameo: haz luminoso producido por el flujo de corriente eléctrica a través de un medio aislante, que produce radiación y gases calientes [1].

Nivel de protección contra rayos: equivale a grado de riesgo. Es el resultado de la valoración conjunta de la probabilidad de ocurrencia de los accidentes, de la gravedad de sus efectos y de la vulnerabilidad del medio [1].

Riesgo tolerable: valor máximo del riesgo que se puede tolerar para el objeto a proteger [2].

Riesgo: medida de las pérdidas anuales probables (seres vivos y en bienes) debidas a rayos, relativo al valor de (seres vivos y en bienes) de los objetos a proteger [2].

Sistema integral de protección contra rayos (SIPRA): sistema usado para reducir los daños físicos que pueden ser causados por el rayo a un ser vivo o a una estructura. Se puede considerar la medida más efectiva para proteger las estructuras contra daños físicos causados por las descargas atmosféricas. Este sistema usualmente consiste tanto de una protección externa, una interna y medidas de seguridad personal contra rayos [2].

Tensión de flameo crítico (CFO): valor de tensión que bajo ciertas condiciones causa un flameo a través de la superficie del aislamiento con una probabilidad de ocurrencia del 50% de las veces que se aplique.

5 CONSIDERACIONES GENERALES

El análisis del rendimiento de redes de distribución de energía frente a descargas atmosféricas inicia con el cálculo del CFO_{total} asociado a las estructuras y la caracterización del área de influencia de la red, con esta información se calculan las salidas previstas debidas a descargas atmosféricas directas e indirectas. Cuando el número total de salidas esperadas supere el máximo permitido se deben estudiar alternativas para mejorar el rendimiento del sistema.

Las posibles mejoras contemplan, el aumento del aislamiento por medio del cambio de materiales de los elementos de apoyo y sujeción, la implementación de dispositivos de protección (cables de guarda o DPS) o mejoras en los sistemas de puesta a tierra asociados a la red de distribución. La decisión sobre la mejora a implementar debe estar fundamentada en un análisis técnico y económico que permita seleccionar la alternativa óptima como se presentará más adelante.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

Para realizar la evaluación del desempeño de redes de distribución de energía frente a rayos se debe disponer como mínimo de la siguiente información de la zona de influencia del circuito.

- **Densidad de descargas a tierra (DDT):** Valor obtenido del documento *NT-12A Norma técnica: parámetros meteorológicos para el diseño de redes de distribución del Grupo EPM* [6].
- **Resistividad del terreno:** Valor medido siguiendo los lineamientos dados por el documento *RA6-014 Norma técnica: Mediciones para el sistema de puesta a tierra*.
- **Apantallamiento natural:** Estimado a partir del numeral 6.1 de la presente guía metodológica.
- **Resistencia de puesta a tierra** (para redes existente en las que se quiere mejorar la confiabilidad): Valor medido siguiendo los lineamientos dados en el documento *RA6-014 Norma técnica: Mediciones para el sistema de puesta a tierra*.

5.2 NÚMERO MÁXIMO DE SALIDAS PERMITIDAS

A continuación, se presenta el número de salidas máximas permitidas por descargas atmosféricas de referencia para los circuitos de distribución de energía del grupo EPM.

- Nivel de tensión II: 15 Salidas -año
- Nivel de tensión III: 11 Salidas -año

5.3 CÁLCULO DEL CFO DE LAS ESTRUCTURAS

La tensión de flameo crítico (CFO) de un elemento se determina a partir de ensayos de laboratorio mediante la aplicación de sobretensiones normalizadas bajo condiciones ambientales controladas hasta conseguir que el aislamiento del elemento bajo estudio falle

y se produzca flameo. Este mismo principio aplica para arreglos de varios elementos, como las estructuras de distribución de energía, que se componen de aisladores, crucetas y postes, entre otros.

En la práctica no resultaría conveniente realizar pruebas a todas las estructuras tipo a implementar en un sistema de distribución de energía, por lo que se han desarrollado métodos de cálculo aproximados para estimar el CFO_{total} de las estructuras.

El cálculo del CFO_{total} de una estructura debe considerar todos los posibles caminos por los que la eventual corriente de rayo podría provocar flameo, el CFO de la estructura será entonces igual al del camino con la menor tensión de flameo crítico calculado (CFO). En la Ecuación 1 se presenta la expresión matemática para el cálculo del CFO_{total} de estructuras.

$$CFO_{total} = CFO_{pri} + CFO_{adic\ sec} + CFO_{adic\ terc} + CFO_{adic\ enés} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- CFO_{total} : tensión de flameo crítico total de aislamiento en serie
- CFO_{pri} : tensión de flameo crítico del aislamiento primario.
- $CFO_{adic\ sec}$: CFO adicional añadido por segundo componente.
- $CFO_{adic\ ter}$: CFO adicional añadido por el tercer componente.
- $CFO_{adic\ enés}$: CFO adicional añadido por el enésimo componente.

El CFO de cada elemento que compone la estructura debe ser suministrado por el fabricante.

Vale la pena resaltar que la Ecuación 1 no es equivalente a la suma lineal del CFO de cada elemento. Las contribuciones al CFO_{total} de los aislamientos complementarios (secundarios, terciario y subsecuentes) son significativamente menores a las que tendrían los mismos elementos si fueran el aislamiento primario.

En la Tabla 1 se presentan los valores de referencia del CFO para diferentes aislamientos primarios y las respectivas contribuciones de los aislamientos complementarios, estos datos son estimados y se deben usar únicamente cuando no se disponga de datos de fábrica.

Tabla 1 Tensión de flameo crítico del aislamiento primario y CFO adicional aportado por los aislamientos complementarios [4]

CFO ^{1,2} de aislamiento primario			CFO adicional del segundo componente		CFO adicional del tercer componente
Descripción	Tipo ³	CFO _{pri} (kV)	Descripción	CFO _{adic sec} (kV/m)	Descripción y CFO _{adic ter} (kV/m)
Aislador polimérico	15 kV a 35 kV		Poste de fibra de vidrio	410	Poste de madera 65
Aislador cerámico tipo pin	ANSI 55-4 ANSI 55-5 ANSI 55-6	105 120 140	Poste de fibra de vidrio Cruceta de fibra de vidrio	400 250	
Cadena vertical de aisladores cerámicos	1x102 mm 2x102 mm 3x102 mm (4")	75 165 250	Cruceta de fibra de vidrio	250	
Cadena horizontal de aisladores cerámicos	1x102 mm 2x102 mm 3x102 mm (4")	75 165 250	Cruceta de fibra de vidrio	250	
Descripción	Tipo	CFO _{pri} (kV/m)	Descripción y CFO _{adic sec} (kV/m)		
Fibra de vidrio	Poste o aislador tensor	470			
Aire		600			

NOTAS:

1. Todos los valores de CFO presentados se obtuvieron bajo condiciones normalizadas en pruebas bajo ambiente húmedo.
2. Los valores son los mínimos entre los obtenidos en las pruebas con flameo positivo y negativo.
3. Los valores presentados para aisladores se presentan como ejemplo. Se debe consultar las fichas técnicas de los fabricantes para obtener valores más exactos.

El CFO de los elementos que no se muestren en la Tabla 1 se pueden estimar por medio de las siguientes aproximaciones:

$$CFO_{adic\ sec} = 0.45 \times CFO_{pri} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$CFO_{adic\ terc} = 0.2 \times CFO_{pri} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

CFO_{pri} : tensión de flameo crítico del aislamiento primario
 CFO_{adic sec} : CFO adicional añadido por segundo componente
 CFO_{adic ter} : CFO adicional añadido por el tercer componente

5.4 EJEMPLO DE CÁLCULO DEL CFO_{TOTAL} DE UNA ESTRUCTURA

A modo de ejemplo se realiza el cálculo del CFO_{total} de la estructura de la Figura 1, con los siguientes datos:

Nivel de tensión: 44 kV

Tipo de estructura: terminal en disposición horizontal

Material del poste: fibra de vidrio

Sección transversal del poste a la altura de la cruceta: 24 cm

Longitud de la cruceta: 3,6 m.

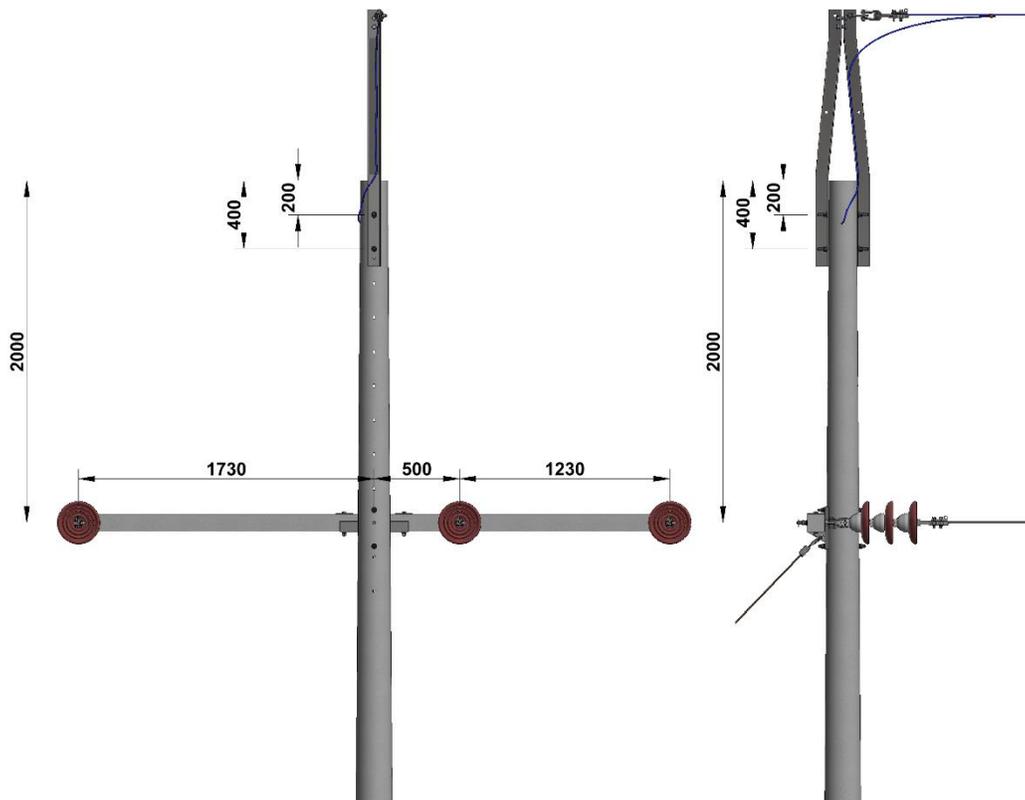
Material de la cruceta: fibra de vidrio

Tipo de red: abierta, trifásica trifilar con cable de guarda puesto a tierra a lo largo de la red.

Tipo de aislador de fases: cadena horizontal de tres aisladores cerámicos tipo ANSI 52-4.

Tipo de aislador tensor para viento: fibra de vidrio de 500 milímetros longitud.

Figura 1 Cálculo de CFO_{total} de una estructura



Fuente: Concol by WSP

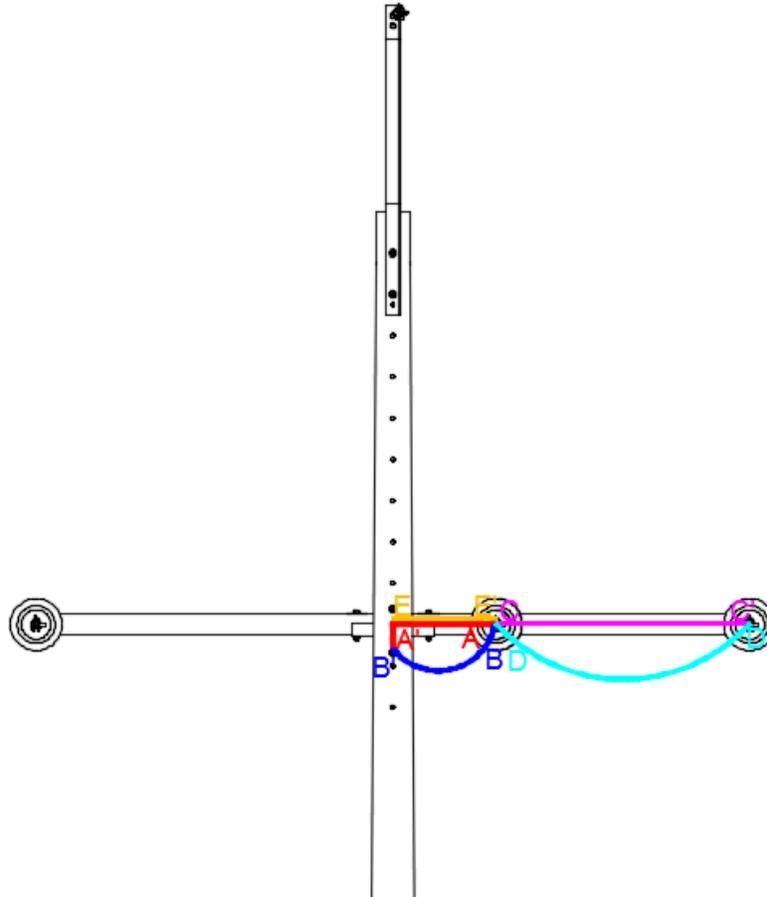
De acuerdo con las consideraciones anteriores, se tienen los siguientes caminos para una eventual corriente de rayo.

1. De la fase central al cable de viento por la cruceta (A – A')
2. De la fase central al cable de viento por el aire (B – B')
3. De la fase de la derecha a la fase central por la cruceta (C – C')
4. De la fase de la derecha a la fase central por el aire (D – D')
5. Del bajante de puesta a tierra a la fase central por la cruceta y el poste (E – E')

Se descartan los caminos que van desde el cable de guarda a los conductores de fase y de la fase izquierda a la fase central debido a que presentan un grado de aislamiento notablemente más alto que los caminos descritos anteriormente.

En la Figura 2 se muestra un esquema con los caminos considerados.

Figura 2 Caminos para una eventual corriente de rayo



En la Figura 3 se presenta una tabla con la información del CFO suministrada por un fabricante de aisladores, se resaltan los datos asociados a 3 aisladores tipo ANSI 52-4 en cadena, como los que se usan en la estructura de la Figura 1.

Figura 3 CFO para arreglos de cadenas de aisladores

Datos de Tensión de flameo para caída de aisladores de suspensión de disco									
5 3/4 " x 9 " and 5 3/4 " x 10 "					6 1/2 x 10 "				
Suspensión Discs					Suspensión Discs				
Lapp Catalog Numbers 9000, 9100, 8100, 8200 5960-G-2300-D, 301425, 301426, 61236, 302268, 302500, 302718, 303025					Lapp Catalog Numbers 97503B, 303027				
Units in String	60 Hz Flashover-Kv		Impulse Flashover-Kv 1,5 x 40		Units in String	60 Hz Flashover-Kv		Impulse Flashover-Kv 1,5 x 40	
	Dry	Wet	Positive	Negative		Dry	Wet	Positive	Negative
2	155	90	250	250	2	180	105	290	280
3	215	130	355	340	3	255	145	380	380
4	270	170	440	415	4	320	195	500	470
5	325	215	525	495	5	375	240	585	565
6	380	255	610	585	6	435	285	690	665
7	435	295	695	670	7	490	330	780	760
8	485	335	780	760	8	550	380	880	860
9	540	375	860	845	9	600	420	970	955
10	590	415	945	930	10	665	465	1070	1065
11	640	4500	1025	1015	11	715	510	1155	1170
12	690	490	1105	1105	12	770	550	1250	1270
13	735	525	1185	1190	13	820	590	1340	1360
14	785	565	1265	1275	14	875	630	1430	1460
15	830	600	1345	1360	15	930	665	1515	1560
16	875	630	1425	1445	16	975	705	1600	1660
17	920	660	1505	1530	17	1020	735	1690	1745
18	965	690	1585	1615	18	1060	770	1785	1835
19	1010	720	1665	1700	19	1110	795	1860	1920
20	1055	750	1745	1785	20	1160	825	1955	2020

• **Camino 1 (De la fase central al cable de viento por la cruceta y el poste (A – A')):**

En este caso el aislador de fase (aislamiento primario), la cruceta (aislamiento secundario) y el aislador tensor (aislamiento terciario) aportan al CFO. De la Figura 3 se obtiene que el CFO del aislador es de 340 kV, mientras que de la Tabla 1 se extrae que el CFO de una cruceta de fibra de vidrio es de 250 kV/m cuando funciona como aislamiento secundario, el CFO del aislamiento terciario se estima por medio de la Ecuación 3, entonces:

$$\begin{aligned}
 CFO_{total} &= CFO_{pri} + CFO_{adic\ sec} + CFO_{adic\ ter} \\
 CFO_{adic\ sec} &= 250\ kV/m \times 0,5 = 125\ kV \\
 CFO_{adic\ ter} &= 0,2 \times CFO_{pri} = 0,2 * 470\ kV/m * 0,5 = 47\ kV \\
 CFO_{total} &= 340\ kV + 125\ kV + 47\ kV \\
 CFO_{total} &= 512\ kV
 \end{aligned}$$

• **Camino 2 (De la fase central al cable de viento por el aire (B – B')):**

En este caso el aire (aislamiento primario) y el aislador tensor (aislamiento secundario) aportan al CFO. De la Tabla 1 se obtiene que el CFO del aire es de 600 kV/m, mientras que para determinar el CFO del aislador tensor de fibra de vidrio se emplea la Ecuación 2:

$$\begin{aligned}
 CFO_{total} &= CFO_{pri} + CFO_{adic\ sec} + CFO_{adic\ ter} \\
 CFO_{pri} &= 600\ kV/m \times 0,5 = 300\ kV \\
 CFO_{adic\ sec} &= 0,45 \times CFO_{pri} = 0,45 * 470 * 0,5 = 105,75\ kV
 \end{aligned}$$

$$CFO_{total} = 300 \text{ kV} + 105,75 \text{ kV}$$

$$CFO_{total} = 405,75 \text{ kV}$$

- **Camino 3 (De la fase de la derecha a la fase central (C – C') por la cruceta):**

En este caso el primer aislador de fase (aislamiento primario), la cruceta (aislamiento secundario) y el segundo aislador de fase (aislamiento terciario) aportan al CFO. De la Figura 3 se obtiene que el CFO del aislador es de 340 kV, mientras que de la Tabla 1 se extrae que el CFO de una cruceta de fibra de vidrio es de 250 kV/m cuando funciona como aislamiento secundario, el CFO del aislamiento terciario se estima por medio de la Ecuación 3, entonces:

$$CFO_{total} = CFO_{pri} + CFO_{adic \ sec} + CFO_{adic \ ter}$$

$$CFO_{adic \ sec} = 250 \text{ kV/m} \times 1,230 = 307,5 \text{ kV}$$

$$CFO_{adic \ ter} = 0,2 \times CFO_{pri} = 0,2 \times 340 \text{ kV} = 68 \text{ kV}$$

$$CFO_{total} = 340 \text{ kV} + 307,5 \text{ kV} + 68 \text{ kV}$$

$$CFO_{total} = 715,5 \text{ kV}$$

- **Camino 4 (De la fase de la derecha a la fase central (D – D') por el aire):**

En este camino la única oposición a la corriente de rayo la hace el aire, que funciona como aislamiento primario. En la Tabla 1 se especifica el aire como aislamiento primario tiene un CFO de 600 kV/m, por lo tanto:

$$CFO_{total} = 1,230 \times 600 \text{ kV/m} = 738 \text{ kV}$$

- **Camino 5 (Del bajante de puesta a tierra a la fase central por la cruceta y a través del poste (E – E')):**

En este caso el aislador de fase (aislamiento primario), la cruceta (aislamiento secundario) y el poste (aislamiento terciario) aportan al CFO. De la Figura 3 se obtiene que el CFO del aislador es de 340 kV, mientras que de la Tabla 1 se extrae que el CFO de una cruceta de fibra de vidrio es de 250 kV/m cuando funciona como aislamiento secundario, el CFO del aislamiento terciario se estima por medio de la Ecuación 3 teniendo en cuenta que el aporte del poste es proporcional a su sección transversal porque el bajante de puesta a tierra se instala al interior de este, entonces,

$$CFO_{total} = CFO_{pri} + CFO_{adic \ sec} + CFO_{adic \ ter}$$

$$CFO_{adic \ sec} = 250 \text{ kV/m} \times 0,5 = 125 \text{ kV}$$

$$CFO_{adic \ ter} = 0,2 \times CFO_{pri} = 0,2 \times 470 \text{ kV} \times 0,12 = 11,28 \text{ kV}$$

$$CFO_{total} = 340 \text{ kV} + 125 \text{ kV} + 11,28 \text{ kV}$$

$$CFO_{total} = 476,28 \text{ kV}$$

Por lo tanto, el CFO_{total} de la estructura es 405,75 kV, que fue el menor valor calculado y corresponde al camino 2.

6 DESEMPEÑO DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

El desempeño de sistemas de distribución de energía frente a sobretensiones de origen atmosféricos se evalúa a partir del número total de salidas de servicio del sistema provocadas por rayos que impactan directa e indirectamente a la red. A continuación, se presenta la metodología para evaluar estos dos escenarios.

6.1 SALIDAS DEBIDAS A DESCARGAS ATMOSFERICAS DIRECTAS

Debido a la magnitud de las sobretensiones que generan los rayos, resulta económicamente inviable evitar que los impactos directos de estos en los conductores de fase provoquen salidas en el sistema de distribución, por lo que se asume que todos los impactos directos sobre las fases producirán flameo. La estimación de las salidas provocadas por descargas directas se convierte entonces en la determinación del número de rayos que impactan directamente sobre los conductores del sistema de distribución estudiado.

La Ecuación 4 permite estimar la tasa de descargas atmosféricas sobre un sistema de distribución en campo abierto (sin elementos que generen apantallamiento alrededor). [4]

$$N = DDT \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

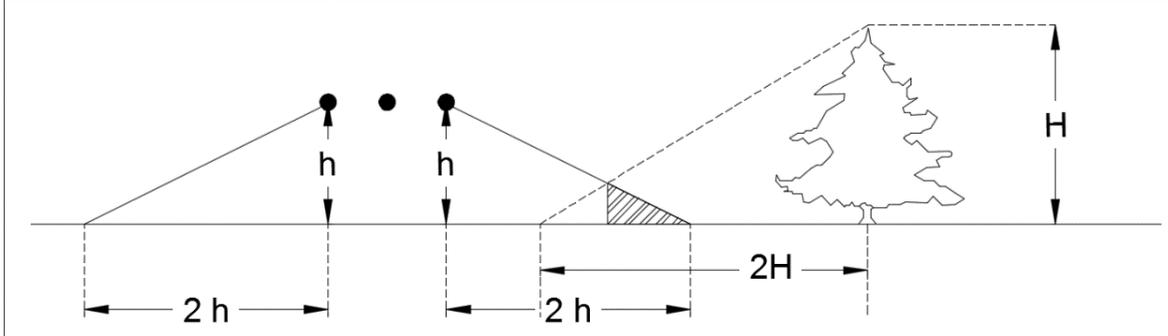
Donde:

- N : tasa de descargas atmosféricas en campo abierto (descargas/100 km/año)
- DDT : densidad de descargas a tierra (descargas por km² por año)
- h : altura del conductor más alto de la estructura de soporte (m)
- b : ancho de la estructura (m)

Se debe tener en cuenta el efecto que tienen los elementos circundantes a las redes, en la medida en que éstos podrían interceptar las descargas atmosféricas. Con el fin de cuantificar este efecto se implementa el factor de apantallamiento natural (S_f), el cual expresa en por unidad la fracción de la red de distribución que se encuentra apantallada por los elementos que la rodean.

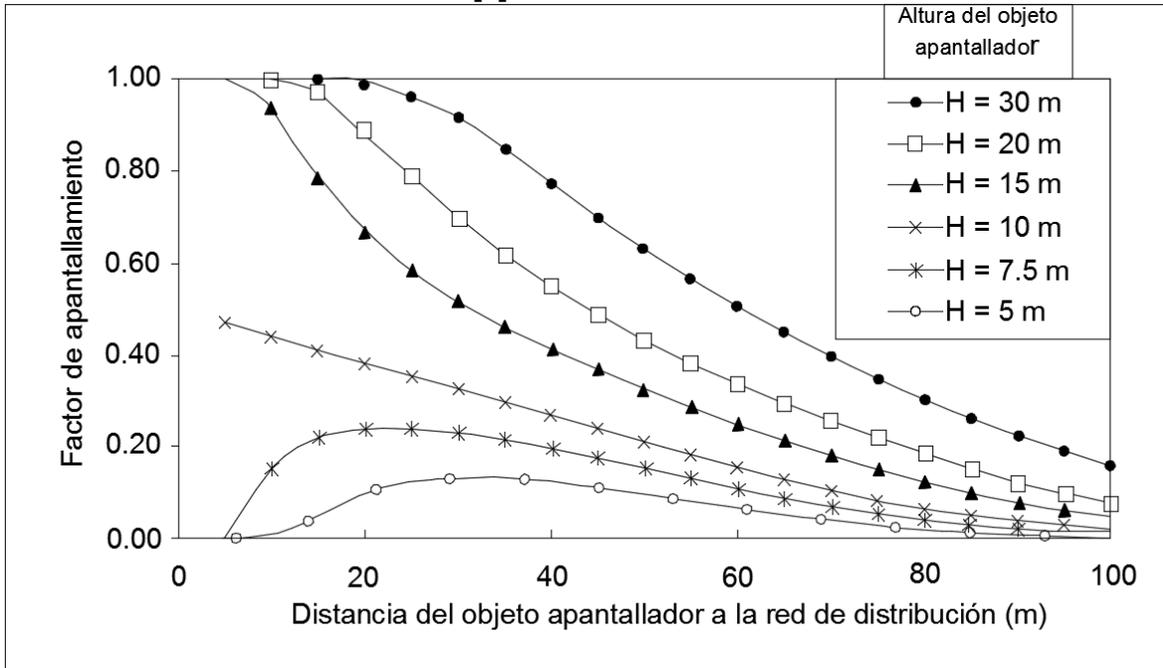
Un factor S_f de 0 significa que la red de distribución está en terreno abierto, sin ningún tipo de blindaje provisto por objetos cercanos, mientras que un S_f de 1 implica que el sistema de distribución está completamente protegido contra descargas atmosféricas directas; condición que no necesariamente implica que la red estudiada esté exenta de todos los efectos de rayos porque se debe contemplar el efecto de las descargas indirectas, como se mostrará más adelante.

En la Figura 4 se muestra el efecto del apantallamiento natural sobre un sistema de distribución de energía.

Figura 4 Zonas de apantallamiento [7]


Debido a la variedad de alturas y formas de los objetos circundantes que generan apantallamiento no es sencillo definir el factor S_f con exactitud, tampoco hay consensos cuantitativos alrededor de los mecanismos de apantallamiento involucrados. Experimentalmente se encontró que el ancho del área protegida o apantallada en la superficie del suelo es aproximadamente 2 veces la altura del objeto que genera el apantallamiento. [7]. En la Figura 4, el ancho de la zona apantallada naturalmente por el árbol sobre la superficie del suelo es $2H$, debido a que el objeto que apantalla (el árbol) tiene una altura H .

En la Figura 5 se presenta una aproximación para estimar el factor de apantallamiento natural S_f . Para el ejercicio se consideró una red de distribución de 10 m de altura, en las proximidades de elementos de diferentes alturas que generan apantallamiento natural y suponiendo que estos se encuentran en paralelo, a un costado y de forma continua a lo largo de la red.

Figura 5 Factor de apantallamiento S_f para objetos de diferentes alturas cercanos a una línea de distribución de 10 m [4]


El factor de apantallamiento S_f permite obtener la tasa de descargas atmosféricas que inciden directamente sobre las redes a partir de la siguiente expresión:

$$N_s = N(1 - S_f) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

N_s : Tasa de descargas atmosféricas que inciden directamente sobre la red (descargas/100 km-año).

N : Tasa de descargas atmosféricas en campo abierto (descargas/100 km-año) calculado con la E

cuación 4.

S_f : Factor de apantallamiento natural, varía de 0 a 1.

La Figura 5 también se puede usar cuando se tienen objetos que generan apantallamiento a los dos costados de la red, sumando los respectivos factores de apantallamiento. Si la suma resultante es mayor que uno (1), el factor de apantallamiento total es uno (1).

Se recomienda evitar la construcción de redes de energía sobre cumbres de accidentes geográficos (cerros, montes, etc.). Si se desea aprovechar el apantallamiento natural de la geografía, es mejor construir a media ladera, esto implicará el uso de una mayor cantidad de estructuras, pero reducirá la probabilidad de caída de rayos sobre la red de distribución de energía. [5]

Sin importar si el aislamiento de las redes de distribución está protegido con cable de guarda o dispositivos de protección contra sobretensiones DPS, más del 99% de las descargas atmosféricas directas provocarán flameo, independientemente del nivel de aislamiento, la distancia entre conductores o las características del sistema de puesta a tierra. Por lo anterior, para estimar el número de flameos debidos a descargas atmosféricas directas se deben usar las expresiones presentadas para evaluar el número de rayos que impactará directamente a la red (la Ecuación 4 en condiciones de campo abierto y la Ecuación 5 para redes con apantallamiento natural).

6.2 SALIDAS DEBIDAS A DESCARGAS ATMOSFERICAS INDIRECTAS

Las descargas atmosféricas que inciden en objetos próximos a las redes de distribución (a menos de 100 m de distancia) pueden provocar flameo como consecuencia de las sobretensiones inducidas en las estructuras a través del suelo.

En esta sección se describen los conceptos principales para el cálculo detallado de las salidas por descargas atmosféricas indirectas. Posteriormente se presenta un método simplificado suficientemente preciso para el propósito de esta guía metodológica.

6.2.1 Método detallado para el cálculo de las salidas debidas a descargas indirectas

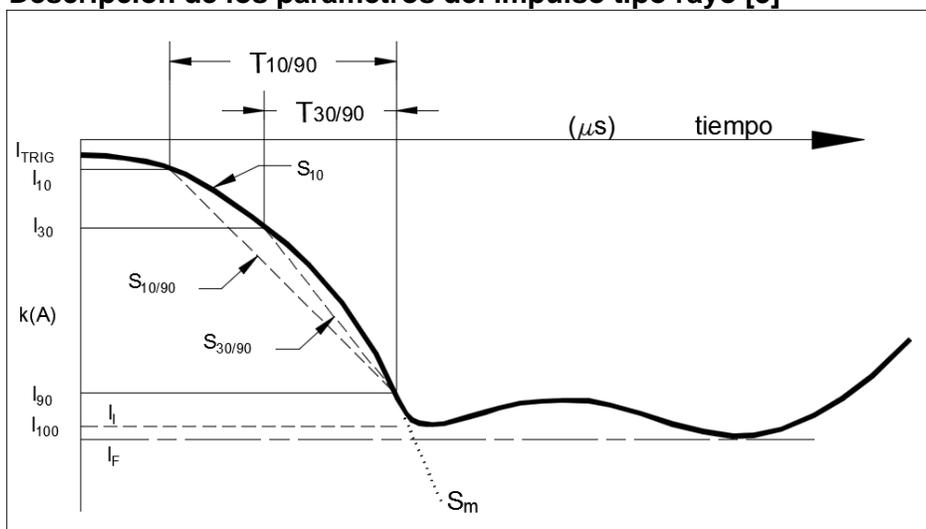
Calcular el número de salidas por sobretensiones debidas a descargas atmosféricas indirectas con el método detallado requiere de modelos de los fenómenos electromagnéticos asociados al rayo, además de considerar los elementos del sistema de distribución y el suelo, empleando simulaciones de los eventos transitorios con

herramientas computacionales como ATP – EMTP, junto con análisis probabilísticos (ver Anexo B [4]).

El cálculo de las tensiones inducidas se realiza por medio del siguiente procedimiento:

- Determinar los lugares donde probablemente incidirán de los rayos y la magnitud del impulso que generarían. Para ello se debe aplicar técnicas probabilísticas como el método de Monte Carlo combinado con la expresión para la tasa de descargas en campo abierto dado en la Ecuación 4.
- Definir la magnitud de la corriente de rayo que impacta el suelo. Este parámetro se puede fijar empleando la forma de onda presentada en la Figura 6 u otro frente de onda con tiempo t_m equivalente.

Figura 6 Descripción de los parámetros del impulso tipo rayo [3]



- Definir un modelo para la corriente de retorno del rayo para obtener la distribución en el espacio a lo largo del tiempo de la corriente. Ver [8] y [9].
- Determinar los campos electromagnéticos asociados con la corriente calculada a lo largo de la línea. Ver [10] y [12].
- Calcular las tensiones transitorias inducidas debidas a los campos electromagnéticos como se muestra a continuación.

La Ecuación 6 permite calcular la máxima sobretensión inducida por descargas atmosféricas indirectas en sistemas de distribución. Bajo este modelo se considera a la red de distribución como un conductor infinitamente largo sobre un suelo ideal. [4]

$$U_m = 30 \left(1 + \frac{\frac{v}{c}}{\sqrt{2 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) \left(\frac{h \cdot I_p}{d} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- U_m : Es el sobrevoltaje máximo en el punto más cercano a la descarga (kV).
 v : Es la velocidad de propagación de la corriente de retorno (m/s), generalmente $c/3$.
 c : Es la velocidad de la luz, 3×10^8 m/s.
 I_p : Es la corriente pico de retorno (kA).
 h : Es la altura del conductor con respecto a la tierra (m).
 d : Es la distancia horizontal de la red de distribución al punto de la descarga (m).

Para contemplar el efecto de la resistividad del suelo en la Ecuación 6 se realiza una aproximación que modifica la altura del conductor con respecto a tierra, remplazándola por una altura aparente que se calcula mediante la Ecuación 7.

$$h_{eff} = h + \frac{4.7}{\sigma} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

- h_{eff} : Es la altura aparente de la red de distribución para el cálculo de U_m
 h : Es la altura del conducto con respecto a la tierra (m)
 σ : Es la conductividad del suelo (mS/m)

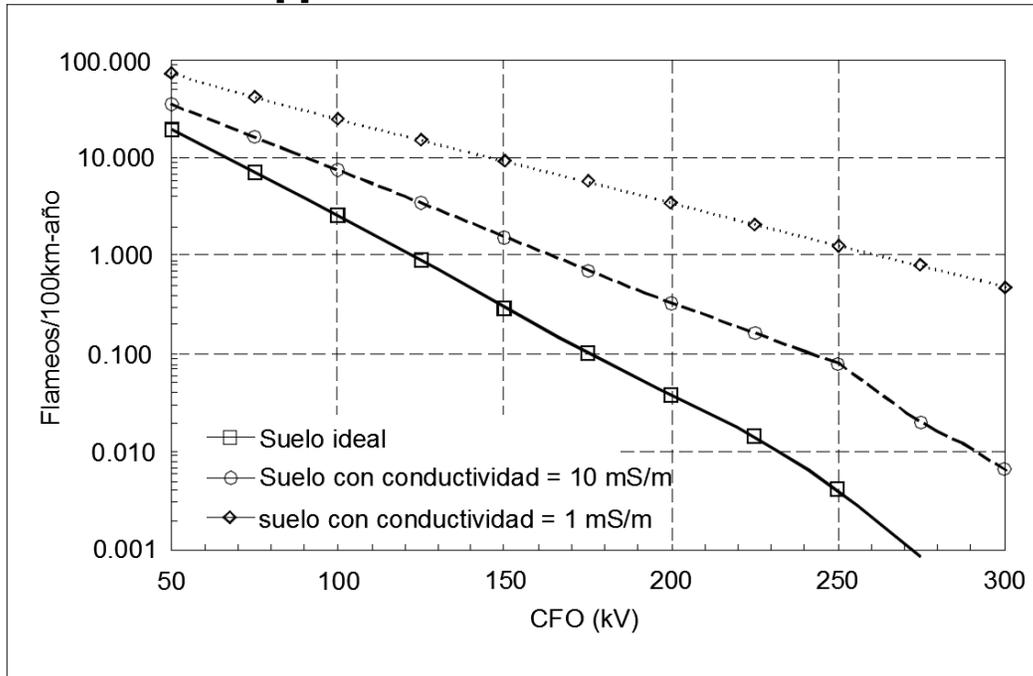
- Estudiar la respuesta del sistema de distribución frente a las tensiones inducidas usando un modelo en ATP- EMTP, en el que se evalúe la interacción del sistema con campos electromagnéticos externos.
- Repetir los cálculos con diferentes puntos de incidencia de los rayos y variando los valores picos del impulso para simular los años de servicio o la vida útil del sistema.
- Los resultados de los cálculos se normalizan para la densidad de descargas atmosféricas locales.

6.2.2 Método simplificado para el cálculo de las salidas debidas a descargas indirectas.

El análisis presentado anteriormente es bastante complejo y difícil de implementar, para el propósito de esta guía metodológica se considera válido realizar el cálculo de las salidas debidas a descargas indirectas por medio de un análisis gráfico, este procedimiento se ha venido aplicando con buenos resultados en sistema de distribución de energía.

En la Figura 7, se muestra el número de flameos producidos por descargas atmosféricas indirectas en función del CFO_{total} de la estructura. Esta gráfica se construyó modelando el sistema como un conductor infinitamente largo a 10 m del suelo, sin apantallamiento natural, para tres rangos de conductividades del suelo. Los valores dados están normalizados para una densidad de descargas atmosféricas a tierra (DDT) de 1 descarga/km²/año, sin embargo, el número de flameos que se obtenga por medio de la Figura 7 se puede escalar linealmente en función del DDT.

Figura 7 Número de flameos por sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas indirectas [4]



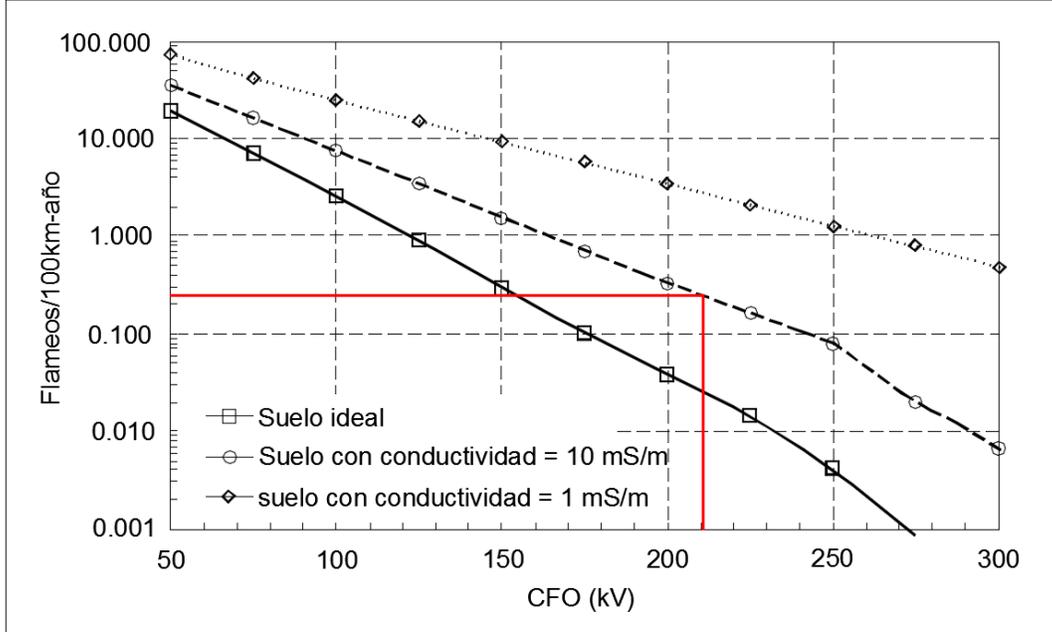
La gráfica de la Figura 7 fue obtenida por medio de un procedimiento basado en el método de Monte Carlo y en los cálculos de tensiones inducidas logrados mediante el uso del código LIOV [4]. El código LIOV (lightning-induced overvoltage code) permite calcular sobretensiones producidas por descargas atmosféricas de forma precisa.

6.2.3 EJEMPLO DE CÁLCULO DE LAS SALIDAS POR DESCARGAS INDIRECTAS A PARTIR DE LA FIGURA 7

A modo de ejemplo, se calcula el número de salidas debidas a descargas atmosféricas indirectas en un sistema de distribución en terreno abierto (sin apantallamiento natural), los siguientes datos de entrada.

- CFO_{Total} de las estructuras: 210 kV
- Longitud de la red: 10 km
- Resistividad del terreno: 100 Ω m
- DDT de la zona: 9 descargas/km²/año

La Figura 7 presenta curvas para tres niveles diferentes de conductividad del suelo. En el caso del ejemplo se tiene una resistividad de 100 Ω m, que equivale a una conductividad de 10 mS/m, por lo que se debe usar la curva del medio para determinar el número de flameos por descarga indirectas. En la Figura 8 se muestra el análisis realizado.

Figura 8 Ejemplo de cálculo de salidas por descargas indirectas [3]


Se identifica el valor del CFO_{TOTAL} de la estructura (210 kV) en el eje X. Este valor se intercepta con la curva del valor de conductividad más próximo al que se tiene en la zona donde se instalará la red, que para el caso del ejemplo es 10 mS/m. Se proyecta este punto sobre el eje Y, para obtener la tasa de flameos por descargas indirectas en el eje Y.

La proyección sobre el eje Y, muestra que la tasa de flameos es 0,3 [flameos/100 km-año]. Dado que este valor está normalizado para una densidad de descargas atmosféricas a tierra de 1 [descarga /km²/año], se debe escalar linealmente. Para el valor de DDT en el ejemplo, 9 [descarga /km²/año], la tasa de flameos por descargas indirectas se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{tasa de flameos por descargas indirectas} = 0,3 * 9 = 2,7 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

Con la tasa de flameos y la longitud de la red de distribución de energía se calcula el número de flameos (equivalente al número de salidas) por descargas indirectas:

$$\text{Flameos por descargas indirectas} = \frac{2,7 * 10}{100} = 0,27 \approx 1 \text{ [flameo/año]}$$

De donde se obtiene que, para el caso del ejemplo, se presenta 1 [flameo/año] por descargas indirectas.

6.3 MEDIDAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A continuación, se presentan distintas alternativas que permitirán mejorar el desempeño de las redes de distribución frente a descargas atmosféricas. Estas incluyen la implementación de elementos de soporte y sujeción de materiales como porcelana, polímeros y fibra de

vidrio, así como la instalación de dispositivos de protección contra sobretensiones en las estructuras, a lo largo del trazado de los circuitos de distribución.

El procedimiento para la evaluación del desempeño de redes de distribución de energía ante descargas atmosféricas es iterativo. Se debe evaluar el comportamiento de la red, con las condiciones iniciales (hipótesis 1). Si las salidas de la red superan las tolerables, se deben implementar mejoras en las estructuras y realizar nuevamente los cálculos. El diseño de redes, desde el punto de vista de su desempeño frente a descargas atmosféricas, se debe realizar bajo el principio de economía; la hipótesis inicial se debe plantear con los materiales de menor costo y las mejoras aplicarse paulatinamente.

A continuación, se muestra el orden en el que se recomienda aplicar las alternativas de mejora. Sin embargo, dado que se pueden llegar a requerir soluciones para casos puntuales, el criterio del diseñador es fundamental en este proceso. Los pasos recomendados a seguir son, entonces:

1. Incremento del CFO de las estructuras:

- Cambio de material de cruceta (metal por fibra de vidrio)
- Cambio material poste (metal o concreto por fibra de vidrio)

2. Instalación de DPS:

- Iniciar con espaciamiento grandes entre DPS contiguos y disminuir la separación si se requiere mejorar la tasa de salidas.

3. Mejorar los valores de resistencia de puesta a tierra.

4. Instalación de cable de guarda.

5. Combinación de las anteriores alternativas.

Durante el proceso de diseño se pueden considerar tantas alternativas de mejora como se considere oportuno y asociado a cada consideración. De esta forma, se debe estimar el número de salidas esperadas y el costo de cada modificación.

La configuración óptima es aquella que con el menor costo posible cumpla con los límites de salidas por descargas atmosféricas permitidas.

A continuación, se profundiza en las soluciones propuestas.

6.3.1 Incremento del CFO de las estructuras

La manera más sencilla para mejorar el desempeño de un sistema eléctrico de distribución aéreo frente a descargas atmosféricas es aumentar la tensión crítica de flameo (CFO_{total}), reemplazando los accesorios de las vestidas de materiales que no aportan al nivel de aislamiento (elementos metálicos y de concreto) por otros que presentan mejor desempeño (elementos de fibra de vidrio).

Para las zonas con alta densidad de descargas atmosféricas se sugiere que las estructuras de las redes de distribución tengan un CFO_{total} de 300 kV en suelos con resistividades menores a 1000 Ω -m, mientras que 420 kV se considera suficiente para terrenos con resistividades mayores a 1000 Ω -m [4].

Para conseguir estos niveles de aislamiento se requiere que las redes de distribución se construyan considerando como mínimo aislamiento primario y secundario, se deben considerar las siguientes combinaciones para mejorar el CFO_{total} de las estructuras:

a. Con aislamiento secundario:

- Aisladores + cruceta de fibra de vidrio
- Aisladores + poste de fibra de vidrio

b. Con aislamiento terciario:

- Aisladores + cruceta en fibra de vidrio + poste en fibra de vidrio

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los vientos que se instalen en zonas con alta densidad de descargas atmosféricas deben contar un aislador tensores intermedio de fibra de vidrio de por lo menos 50 cm para que la estructura cumpla con el mínimo CFO_{total} recomendado. Históricamente se han implementado aisladores de porcelana, sin embargo, estos presentan un CFO de alrededor de 30 kV por lo que disminuye el CFO_{total} de las estructuras y representan un problema en las redes ubicadas en zonas con alta densidad de descargas atmosféricas [3].

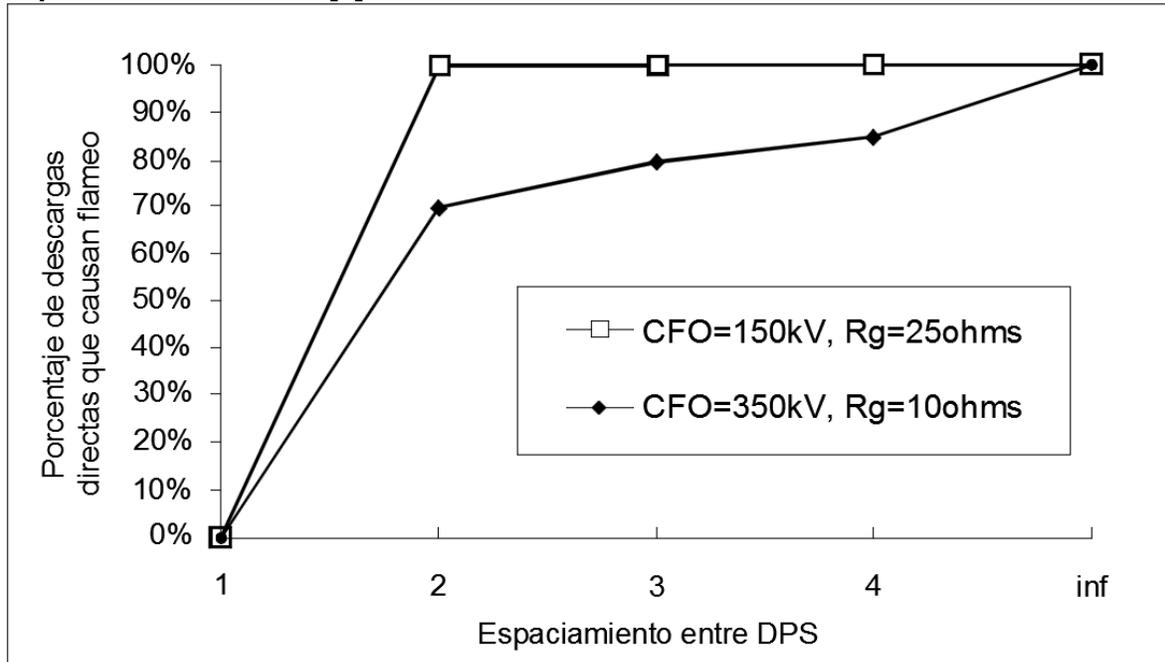
6.3.2 Optimización del desempeño de las estructuras ante descargas atmosféricas mediante instalación de descargadores de sobretensión (DPS)

La segunda medida recomendada para mejorar el desempeño de redes de distribución de energía es la instalación de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS). Estos equipos conducen a tierra la corriente producida por las descargas atmosféricas y se pueden por tanto usar para proteger los elementos aisladores de las líneas de distribución, reduciendo la frecuencia de flameos. La efectividad del uso de estos dispositivos para mejorar el desempeño de las redes de distribución guarda relación directa con el espaciamiento entre DPS contiguos a lo largo del circuito y las resistencias de puesta a tierra asociadas.

6.3.2.1 Efectos de los DPS sobre las descargas directas

La Figura 9 muestra el comportamiento de un sistema de distribución de energía frente a descargas atmosféricas directas en función de la separación de los DPS con respecto a las estructuras. Para la elaboración de la gráfica se consideró un espaciamiento entre estructuras de 75 m, con neutro puesto a tierra en todos los postes. Se construyeron modelos para un CFO_{total} de las estructuras de 150 kV con R_g de 25 Ω y para un CFO_{total} de las estructuras de 350 kV con R_g de 25 Ω .

Figura 9 Porcentaje de descargas atmosféricas que causan flameo en función de la separación de los DPS [4].



Para efectos de la presente guía metodológica se considera suficientemente preciso extrapolar el porcentaje de descargas directas que causan flameo obtenido de la Figura 9 para otros casos, como se muestra en el siguiente ejemplo.

El efecto de los DPS es altamente sensible al valor de la resistencia de puesta a tierra, por lo que para aprovechar a cabalidad la utilidad de los DPS es importante mantener valores de resistencia de puesta a tierra bajos, sin embargo, solamente esta condición no garantiza que los DPS sean funcionales frente a descargas atmosféricas directas.

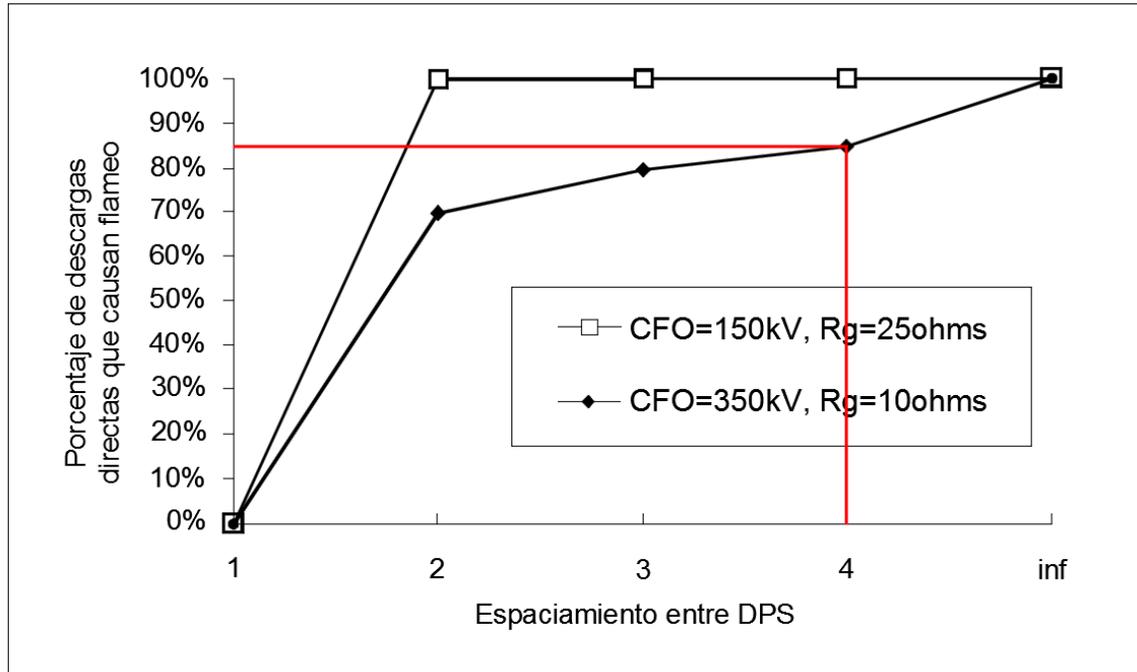
De la Figura 8 se puede observar que, con un CFO_{total} de 150 kV, una resistencia de puesta a tierra de 25 Ω y DPS en todas las estructuras, el porcentaje de descargas atmosféricas directas que causan flameo en un sistema de distribución se reduce a cero por ciento (0%), cuando se deja un poste de por medio entre DPS contiguos, manteniendo las demás condiciones iguales, el efecto de los DPS contra descargas directas es prácticamente nulo.

- **Ejemplo de cálculo del efecto de instalar DPS sobre las salidas por descargas directas a partir de la Figura 9.**

A modo de ejemplo se estima el número de flameos por descargas directas para una red a la que se le instalarán DPS cada 4 apoyos. Las estructuras tienen un CFO_{TOTAL} de 410 kV y una resistencia de puesta a tierra de 10 Ω . Sin la instalación de DPS la red presenta 20 flameos-año por descargas directas.

En la Figura 10 se muestra el análisis que se hace a partir de la Figura 9 para estimar el porcentaje de reducción de flameos por descargas indirectas.

Figura 10 Ejemplo del cálculo de salidas por descargas directas instalando DPS cada 4 estructuras.



El CFO_{total} de la estructura considerada es de 410 kV. Se trabaja con el valor más cercano por debajo del CFO_{total} que en este caso es 350 kV, encontrando que el 85% de los impactos directos causan flameo si se instalan DPS cada 4 estructuras. Como el sistema presenta 20 [flameos-año] por descargas directas antes de la instalación de DPS, entonces:

$$\text{Salidas por descargas directas con la mejora} = 20 * 0,85 = 17 \text{ [flameos/año]}$$

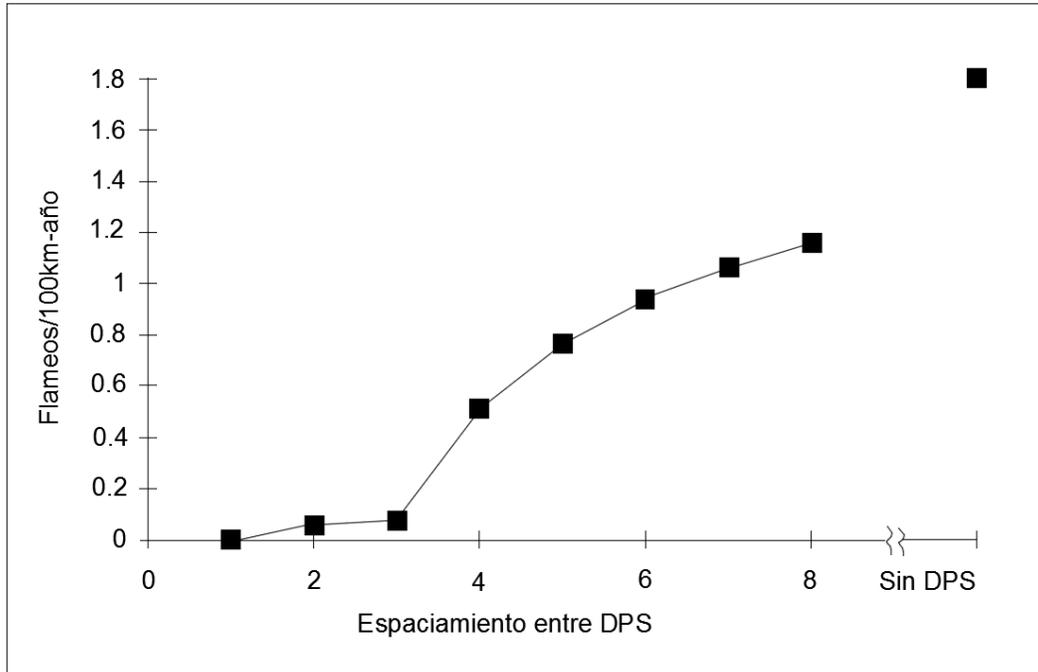
Con la mejora implementada se presentarían 17 flameos/año por descargas directas.

6.3.2.2 Efectos de los DPS sobre las descargas indirectas

En la Figura 11 se muestra la contribución de la instalación de DPS a la reducción de la frecuencia de flameos por descargas atmosféricas indirectas. Para construir la gráfica se supuso un CFO_{total} de las estructuras de 150 kV, 10 m de altura del conductor, una densidad de descargas atmosféricas de 1 descarga/ km²/año y una separación entre estructuras contiguas de 75 m.

La grafica muestra la tasa de flameos por descargas indirectas (eje Y) en función de la separación de los DPS con respecto a las estructuras (1 espacio corresponde a 75 m), para efectos de la presente guía se considera suficientemente preciso extrapolar el análisis de la Figura 11 para otros sistemas de distribución por medio del porcentaje de reducción de la tasa de flameos por descargas indirectas dado en la Ecuación 8.

Figura 11 Flameos por descargas indirectas en función de la separación entre DPS [4].



El porcentaje de reducción de la tasa de flameos por descargas indirectas se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ reducción de la tasa de flameos por descargas indirectas} = \frac{Y_i \cdot 100}{1.8} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

Y_i: Es la tasa de flameos por descargas indirectas (valor en el eje Y) correspondiente al espaciamiento seleccionado

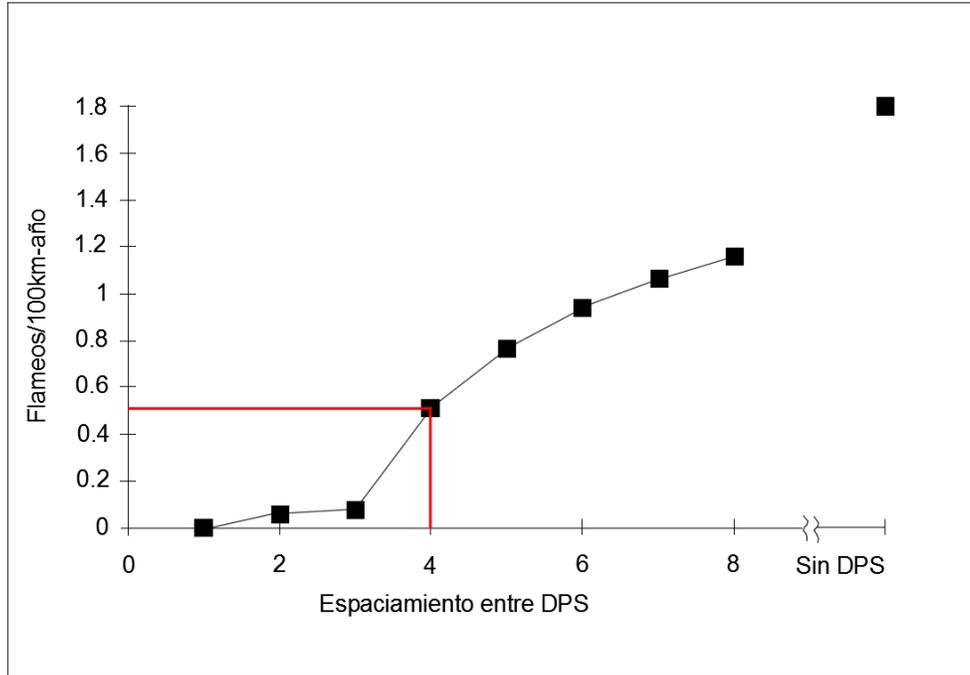
El factor de 1.8 es la tasa de flameos por descargas indirectas [flameos/100 km-año] que se producen sin instalar ningún DPS para las condiciones en las que se realizó el modelo de la Figura 11.

- **Ejemplo de cálculo del efecto de instalar DPS sobre las salidas por descargas indirectas a partir de la Figura 11.**

A modo de ejemplo se estima el número de flameos por descargas indirectas para una red a la que se le instalarán DPS cada 4 estructuras que presenta 15 flameos/año debidos a descargas indirectas.

En la Figura 12 se muestra el análisis que se hace a partir de la Figura 11 para estimar el porcentaje de reducción de flameos por descargas indirectas.

Figura 12 Ejemplo del cálculo de salidas por descargas indirectas instalando DPS cada 4 estructuras



De acuerdo con el análisis anterior para DPS ubicados cada 4 estructuras se tienen 0,5 [flameos/100 km-año], con lo que se aplica la Ecuación 8 para determinar el porcentaje de reducción.

$$\% \text{ reducción de la tasa de flameos por descargas indirectas} = \frac{0.5 * 100}{1,8} = 27,77\%$$

EL porcentaje de reducción con la mejora es del 27,7%, sin la mejora se tiene que las salidas debidas a descargas indirectas son 15 [flameos/año], por lo tanto:

$$\text{Salidas por descargas indirectas con la mejora} = 15 * 0,2777 = 4,1655 \approx 5 \text{ [flameos/año]}$$

Con la mejora implementada se presentarían 5 flameos/año por descargas indirectas.

6.3.2.3 Recomendaciones para la instalación de DPS

En la Figura 9 y la Figura 11 se evidencia que cuando se considera la instalación de DPS en todas las estructuras los flameos se reducen prácticamente a cero, sin embargo en la práctica instalar estos dispositivos en las tres fases y en todos los postes resulta inviable económicamente, por lo que se propone las siguientes medidas para mejorar el rendimiento frente a rayos de las redes de distribución manteniendo el principio de economía.

- En zonas urbanas se deben instalar DPS en los puntos donde se realicen derivaciones de la red, transiciones de red aérea a subterránea y en donde se instalen transformadores y equipos de maniobra que lo requieran.

- En circuitos rurales y/o con altas densidades de descargas atmosféricas a tierra, se recomienda implementar estructuras con neutro superior (que actúe como elemento de apantallamiento) junto con DPS. El espaciamiento entre DPS contiguos puede variar desde cada 8 y hasta cada 4 estructuras (dependiendo del requerimiento de la red), además se deben instalar dispositivos de protección contra sobretensiones en los casos que se definieron en el ítem anterior.
- Se deben obtener valores de resistencia de puesta a tierra de los DPS de máximo 25 Ω . En las zonas de alta densidad de descargas atmosféricas es recomendable alcanzar valores de resistencia de puesta a tierra asociados a los DPS de 10 Ω .

6.3.3 Instalar cables de guarda

La instalación de cable de guarda es una alternativa efectiva para reducir los impactos directos de descargas atmosféricas en los conductores de fase. Sin embargo, la corriente de rayo que se drena por los sistemas de puesta a tierra genera una elevada diferencia de tensión entre el bajante de los sistemas de puesta a tierra y los conductores de fase, lo que podría provocar flameo inverso. Por lo anterior, los cables de guarda podrían ofrecer una protección efectiva solo si:

- Se tiene un valor de CFO suficientemente alto entre los bajantes de los sistemas de puesta a tierra y los conductores de fase.
- Los sistemas de puesta a tierra de las bajantes tienen valores de resistencia bajos.

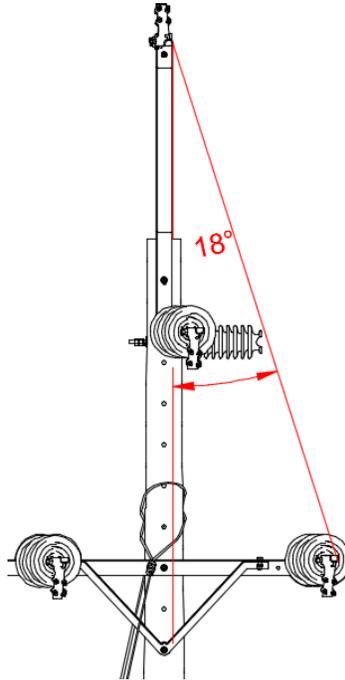
Es importante precisar que los cables de guarda incrementan la altura de las estructuras por lo que aumentan la cantidad de descargas que impactan directamente en la red, de acuerdo con la Ecuación 4. Sin embargo, los cables de guarda se han venido implementando exitosamente en redes de distribución. A continuación, se dan algunas consideraciones a tener en cuenta para mejorar el rendimiento de los cables de guarda en redes de distribución de energía.

6.3.3.1 Ángulo de apantallamiento

El ángulo de apantallamiento es un indicador del grado de protección que ofrece el cable de guarda frente a descargas atmosféricas directas ya que los ángulos pequeños suministran mayor apantallamiento que los ángulos más grandes. En la Figura 13 se muestra este concepto de manera esquemática.

Con un ángulo de apantallamiento, como el que se muestra en la Figura 13, menor o igual a 30° se considera que se tiene un apantallamiento efectivo, de esta forma la mayoría de los rayos que impacten directamente la red lo harán sobre el cable de guarda y no sobre los conductores de fase.

Siempre que se considere la instalación de cable de guarda la topología de las estructuras debe garantizar un apantallamiento efectivo.

Figura 13 Ángulo de apantallamiento en redes de distribución [4]

6.3.3.2 Requerimientos en aislamiento

La implementación de cables de guarda requiere de bajantes de puesta a tierra que permitan drenar las corrientes de rayo. En sistemas de distribución de energía se debe prestar especial atención al aislamiento entre las bajantes de puesta a tierra y los conductores de fase, dado que este factor afecta directamente la efectividad de los cables de guarda.

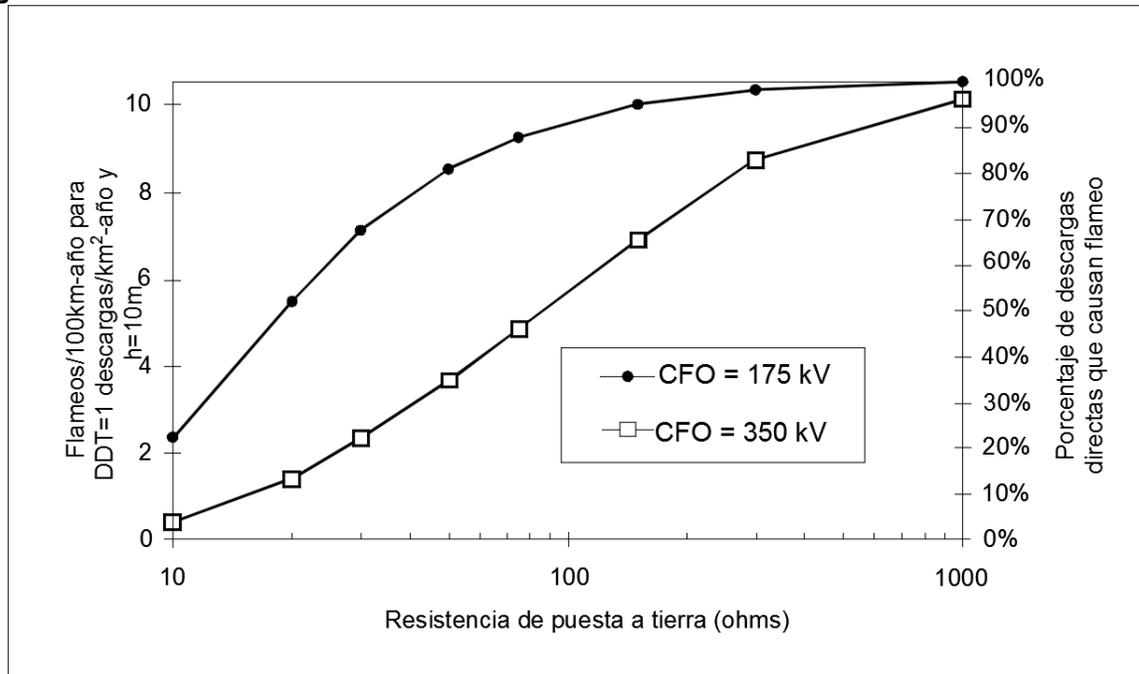
En el documento *RA6-010 Norma técnica: puesta a tierra de redes de distribución eléctrica* se estableció que en el sistema de distribución del Grupo EPM las bajantes de los sistemas de puesta a tierra se deben ubicar al interior de los postes, por lo tanto, para proporcionar un adecuado aislamiento entre los conductores de fase y las bajantes de puesta a tierra, se deben implementar crucetas de fibra de vidrio, ubicando el conductor más próximo al poste a no menos de 50 cms de este.

6.3.3.3 Efecto de la resistencia de puesta a tierra

El rendimiento de los cables de guarda depende en gran medida de los valores de resistencia de puesta a tierra que se presenten a lo largo del sistema de distribución. Para estructuras con CFO_{total} de 200 kV se recomienda tener resistencias de puesta a tierra del orden de 10 Ω . Si se consiguen mejores condiciones en el aislamiento llegando a valores de CFO_{total} de las estructuras de 300 a 350 kV una resistencia de puesta a tierra de 30 Ω es un valor recomendable. Poner a tierra el cable de guarda en todas las estructuras es una práctica con impacto bastante positivo para el rendimiento del cable de guarda en sistemas de distribución de energía.

En la Figura 14 se muestra el porcentaje de los rayos que al impactar directamente en la red causan flameo, en función de la resistividad del terreno cuando se instala cable de guarda. El análisis se realizó para valores de CFO_{total} de las estructuras de 175 y 350 kV. Para elaborar el modelo se supuso un espaciamiento entre estructuras de 75 m.

Figura 14 Efecto de la resistencia de puesta a tierra en el rendimiento de cables de guarda.

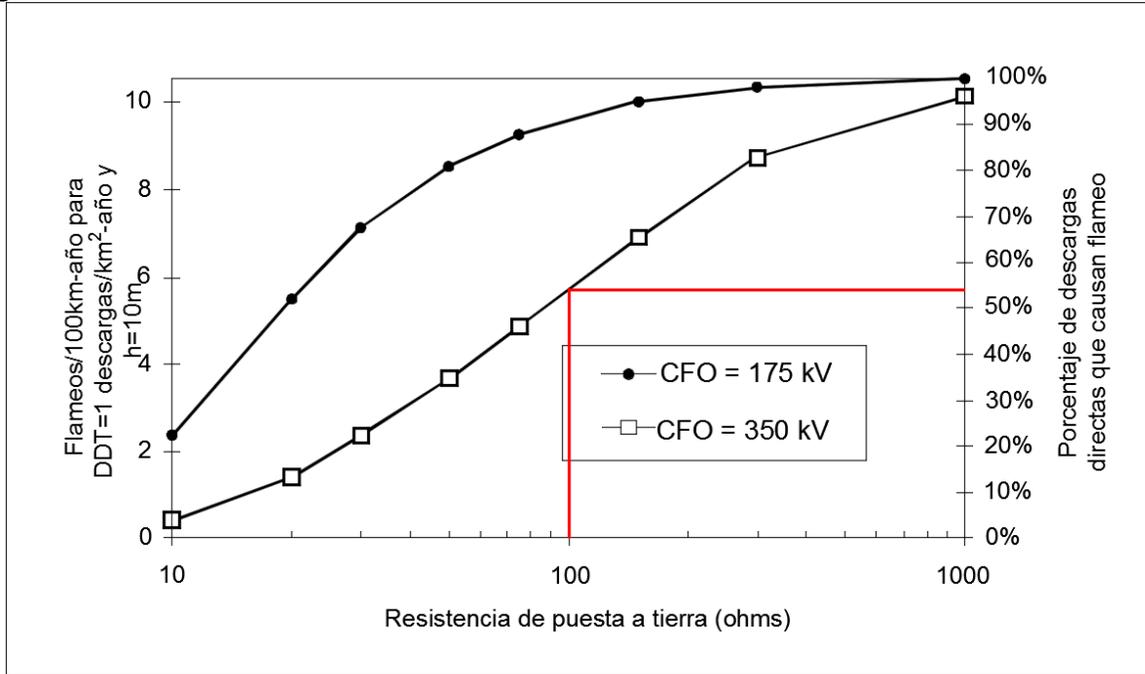


- **Ejemplo de cálculo del efecto de instalar cable de guarda sobre las salidas de sistemas de distribución de energía.**

A modo de ejemplo se va a evaluar el efecto de instalar el cable de guarda en una red de distribución de energía con un CFO de 370 kV y una longitud de 10 km, ubicado en un terreno con resistividad de 100 Ω y tiene una tasa de salidas por descargas directas de 20 flameos/100 km- año.

En la Figura 15 se muestra el análisis que se realiza para evaluar el efecto del cable de guarda a partir de la Figura 14.

Figura 15 Ejemplo del cálculo de salidas por descargas directas instalando cable de guarda.



De acuerdo con la Figura 15 el porcentaje de descargas directas que causa flameo para estructuras con CFO_{total} de 350 kV es cercano al 55%, en el caso de estudio el CFO_{TOTAL} de las estructuras es 370 kV (una mejor condición de aislamiento). Se hace una aproximación lineal inversa para determinar el porcentaje para el ejemplo.

$$\% \text{ descargas directas que provoca flameo} = \frac{350 * 0.55}{370} * 100 = 52,02\% \approx 53\%$$

Con el porcentaje estimado de descargas directas que causan flameo se calcula la tasa de flameos de la siguiente forma:

$$Tasa \text{ de flameos por descargas directas} = 20 * 0,53 = 10,6 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

La longitud de la red de distribución de energía es 10 kms, a partir de estos datos se obtiene el número de flameos por descargas directas:

$$Flameos \text{ por descargas directas} = \frac{10,6 * 10}{100} = 1,06 \approx 2 \text{ [flameos - año]}$$

Con la mejora propuesta el número de flameos por descargas directas es 2 flameos/año por descargas directas.

6.3.4 Cable de guarda junto con dispositivos de protección contra sobretensión (DPS)

La instalación de DPS mejora el rendimiento de cables de guarda en los casos que no sea posible alcanzar los valores requeridos de CFO y resistencia de puesta a tierra dado en el ítem anterior. Los DPS permiten que el rendimiento de los cables de guarda dependa menos del aislamiento y los sistemas de puesta a tierra, por lo que la combinación resulta muy útil para terrenos con altas resistividades del terreno como las que se presentan en gran parte del área de influencia del Grupo EPM.

La ubicación de los DPS en conjunto con cables de guarda debe seguir las mismas recomendaciones que se suministran en el capítulo 6.3.2.3.

6.3.5 Mejorar los valores de resistencia de puesta a tierra

Como se mencionó en anteriormente, el rendimiento de las redes con cable de guarda y/o DPS frente a descargas atmosféricas es altamente dependiente de los sistemas de puesta a tierra, por lo que reducir los valores de las resistencias de puesta a tierra, en redes de distribución existentes que presenten deficiencias por salidas provocadas por rayos, es una alternativa con alta incidencia en el rendimiento de la red y por lo tanto debe ser evaluada.

6.4 EJEMPLO: DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A 44 KV UBICADO EN PUERTO BERRÍO, ANTIOQUIA.

Con el fin de aplicar el procedimiento expuesto en los numerales anteriores, mediante un ejemplo práctico, se va a evaluar el desempeño frente a descargas atmosféricas de una red de distribución de energía a 44 kV, de 10 km de longitud, ubicada en el municipio de Puerto Berrío en Antioquia. El sistema de distribución fue construido bajo la norma NC-RA1-103 y empleando aisladores clase ANSI 52-4.

6.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

Puerto Berrío es un municipio localizado en la región del Magdalena Medio del departamento de Antioquia. Se dispone de los siguientes datos de interés para el análisis del desempeño de la red frente a rayos.

Clima:	Bosque seco tropical
Altitud:	125 m.s.n.m.
DDT:	14,4 [descargas x km ² x año] (tomado del documento NT-12A Norma técnica: parámetros meteorológicos para el diseño de redes de distribución del Grupo EPM [6])
Resistividad del terreno:	Alta >500 Ωm (tomado del mapa de resistividades para el área de influencia de EPM, anexo G del documento <i>GM-04 Guía metodológica: cálculo de sistema de puesta a tierra</i>). Se asume un valor de 1000 Ωm para este ejercicio.
Resistencia de puesta a tierra:	Se presentan valores promedio de 120 Ω, aunque según la tabla 15.4 de RETIE se recomienda un valor de 20 Ω. El bajante de puesta a tierra se ubica al interior del poste 4,6 m por debajo de la cima.
Apantallamiento natural:	Vegetación con altura reducida. Se considera factor de apantallamiento natural $S_f = 0,1$

6.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

En la Figura 16 se muestra la estructura tipo del sistema de distribución del ejemplo. Es un arreglo en disposición delta, con un poste de concreto de 14 m, cruceta metálica de 1,5 m y con cable de guarda. Los conductores se sujetan con aisladores de porcelana clase ANSI 52-4 a una altura de 11,5 m (fase superior) y 10,4 m (fases inferiores) sobre el nivel del suelo, además cuenta con un aislador separador clase ANSI 57-2. En la Figura 17 y la Figura 18 se presentan los datos relevantes de los aisladores implementados.

Figura 16 Estructura en delta con cruceta de 1500mm de retención NC-RA1-103.

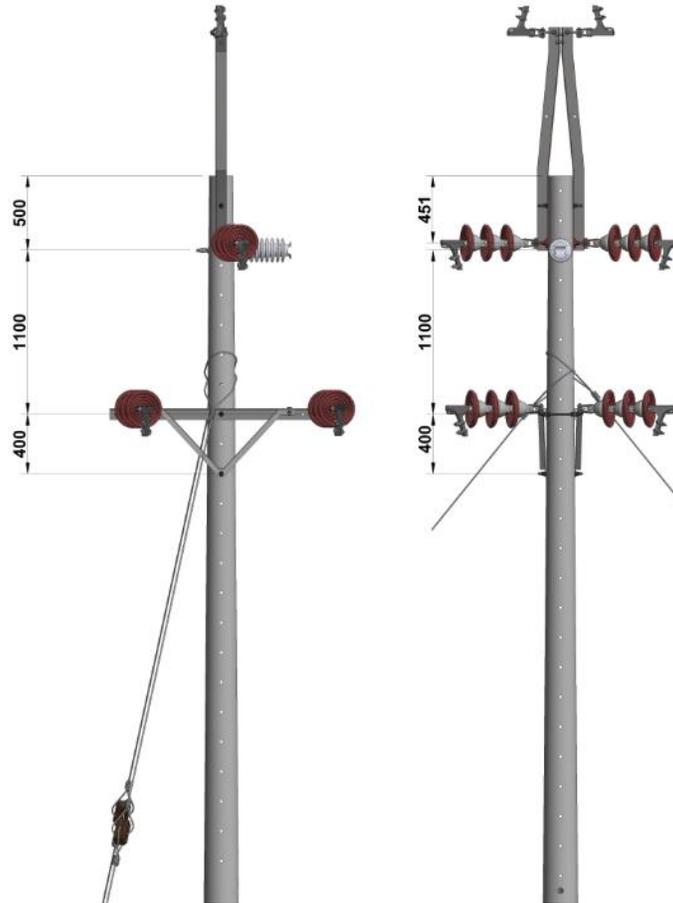
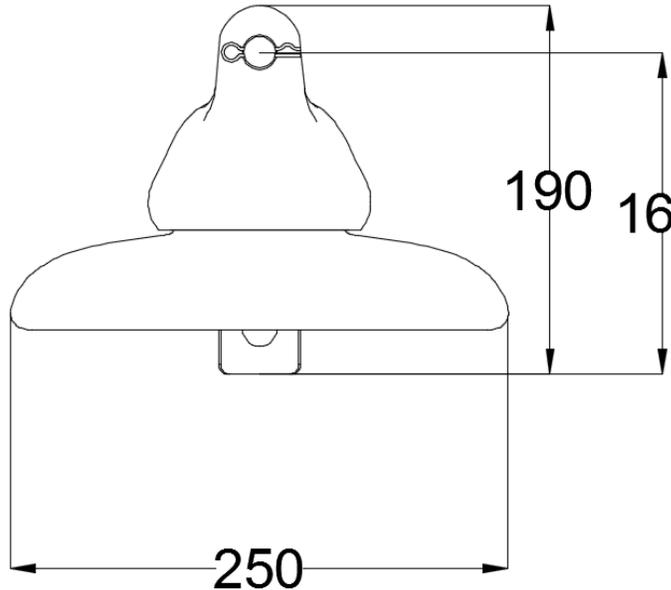
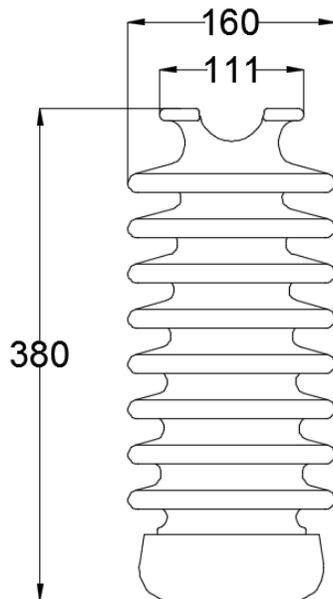


Figura 17 Aislador clase ANSI 52-4 Gamma


5 3/4" x 9" and 5 3/4" x 10" Suspension Discs				
Lapp Catalog Numbers 9000, 9100, 8100, 8200, 5960-G, 2300-D, 301425, 301426, 61236, 302268, 302500, 302718, 303025				
Units in String	60 Hz Flashover - kV		Impulse Flashover - kV	
	Dry	Wet	Positive 1.5 x 40	Negative
2	155	90	250	250
3	215	130	355	340
4	270	170	440	415
5	325	215	525	495
6	380	255	610	585
7	435	295	695	670
8	485	335	780	760
9	540	375	860	845
10	590	415	945	930
11	640	455	1025	1015
12	690	490	1105	1105
13	735	525	1185	1190
14	785	565	1265	1275
15	830	600	1345	1360
16	875	630	1425	1445
17	920	660	1505	1530
18	965	690	1585	1615
19	1010	720	1665	1700
20	1055	750	1745	1785

Figura 18 Aislador clase ANSI 57-2 Gamma


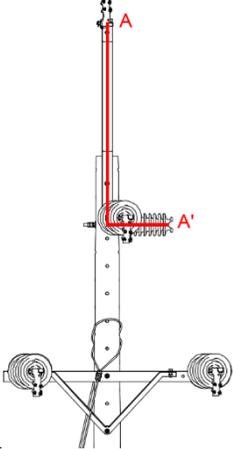
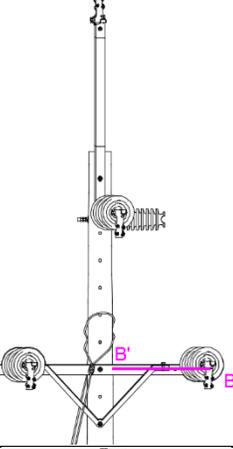
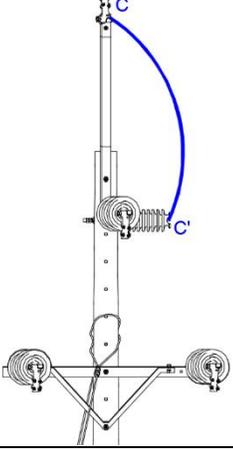
Número de catálogo	8410
Clase ANSI C29.7	57-2
Distancias críticas, mm	
Distancia de arco	241
Distancia de fuga	570
Valores mecánicos	
Resistencia	12,5
Valores eléctricos, kV	
Tensión típica de aplicación	35
Flameo de baja frecuencia en seco	115
Flameo de baja frecuencia en húmedo	70
Flameo crítico al impulso positivo	179
Radio influencia	
Tensión de prueba, kV	22
RIV máximo a 1000 kHz, μ V	100
Dimensiones según esquema	
Número de campanas, A	6.54

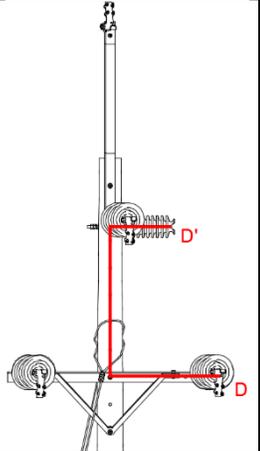
Fuente: <https://www.gamma.com.co/wp-content/uploads/2016/03/8410.pdf>. 28 de agosto de 2019.

6.4.3 CÁLCULO DEL NIVEL DE AISLAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS

Examinando la estructura de la Figura 16 se observa que se podría presentar flameo por los caminos que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Posibles rutas por las que la corriente de rayo podría provocar flameo

De	A	Camino de arco	Esquema del flameo
Cable de guarda	Fase superior	Elemento 1: Aislador clase ANSI 57-2	
Fase derecha	Bajante de puesta a tierra	Elemento 1: cadena de aisladores clase ANSI 52-4	
Cable de guarda	Fase superior	Longitud de distancia de aislamiento en aire	

De	A	Camino de arco	Esquema del flameo
Fase derecha	Fase superior	Elemento 1: cadena de aisladores clase ANSI 52-4 Elemento 2: Aislador clase ANSI 57-2	

De la Figura 17 y la Figura 18 se obtienen los CFO de los aisladores de la estructura que se muestra a continuación.

Cadena de 3 aisladores ANSI 52-4: 340 kV

Aislador ANSI 57-2: 179 kV

Con estos datos se calculó el CFO_{total} de la estructura.

Camino 1 (cable de guarda a la fase superior):

$$\text{CFO}_{\text{total}} = \text{CFO}_{\text{pri}}$$

$$\text{CFO}_{\text{total}} = 179 \text{ kV}$$

Camino 2 (de la fase derecha a bajante de puesta a tierra):

$$\text{CFO}_{\text{total}} = \text{CFO}_{\text{pri}}$$

$$\text{CFO}_{\text{total}} = 340 \text{ kV}$$

Camino 3 (cable de guarda a la fase superior por el aire):

Con base en la Tabla 1 el aire como aislamiento primario tiene un CFO de 600 kV/m. El cálculo del CFO para este camino se realiza para la línea recta a través el aire entre el cable de guarda y la fase central que es la más próxima a este.

$$\text{CFO}_{\text{total}} = \text{CFO}_{\text{pri}}$$

$$\text{CFO}_{\text{pri}} = 600 \text{ kV/m} \times 1,5 = 900 \text{ kV}$$

Camino 4 (de la fase derecha a la fase superior):

$$\text{CFO}_{\text{total}} = \text{CFO}_{\text{pri}} + \text{CFO}_{\text{adic sec}}$$

$$CFO_{pri} = 340 \text{ kV}$$

$$CFO_{adic \text{ sec}} = 0,45 \times 179 \text{ kV} = 80,55 \text{ kV}$$

$$CFO_{total} = 420,55 \text{ kV}$$

En la Tabla 3 se muestra el resultado de los cálculos anteriores.

Tabla 3 CFO_{total} de la estructura NC-RA1-103

De	A	Camino de arco	CFO total (kV)
Cable de guarda	Fase superior	Aislador clase ANSI 57-2 (179 kV)	179
Fase derecha	Bajante de puesta a tierra	Cadena de aisladores clase ANSI 52-4 (340 kV)	340
Cable de guarda	Fase superior	Longitud de distancia de aislamiento en aire (900 kV)	900
Fase derecha	Fase superior	Cadena de aisladores clase ANSI 52-4 (340 kV) Aislador clase ANSI 57-2 (80.55)	420,55

El menor valor de CFO obtenido es 179 kV que corresponde al camino para la corriente de rayo del cable de guarda a la fase superior y es el CFO_{total} de la estructura considerada.

Antes de estimar el número de salidas por descargas directas e indirectas, a partir de los datos calculados se puede alertar que de acuerdo con el apartado 6.3.1 de la presente guía metodológica el CFO_{total} de 179 kV es muy bajo y la resistencia de puesta a tierra de 120 Ω excesivamente alta teniendo en cuenta el DDT de la zona de influencia de la red. A priori se esperaría que la red de distribución estudiada presente problemas por salidas provocadas por descargas atmosféricas, de cualquier forma, se realiza el procedimiento para comprobar la hipótesis anterior.

Por otra parte, es evidente que la configuración en delta con cable de guarda es crítica, porque la fase superior se ubica a la altura de la bayoneta creando un camino favorable para la corriente de rayo, el cual tendrá como única oposición al aislador separador. La condición anterior se mantiene aún si se incluyen aislamientos complementarios, por lo que la oportunidad de mejora de esta estructura es reducida.

6.4.4 FLAMEOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRECTAS

Se calcula la tasa de descargas atmosféricas que inciden directamente en la red de distribución de energía en campo abierto de acuerdo con la presente guía, de la siguiente forma.

$$N = DDT \left(\frac{28h^{0,6} + b}{10} \right)$$

De la Figura 16 se deduce que el ancho de la estructura (b) es 1,5 m y que el conductor más alto está 11,5 m sobre el nivel del suelo, mientras que de la caracterización de la zona se sabe que el DDT es 14,4 descargas x km²x año. Por lo tanto, se tiene el siguiente cálculo:

$$N = 14.4 \left(\frac{28 * (11.5)^{0.6} + 1.5}{10} \right) = 181 \text{ [descargas/100 km - año]}$$

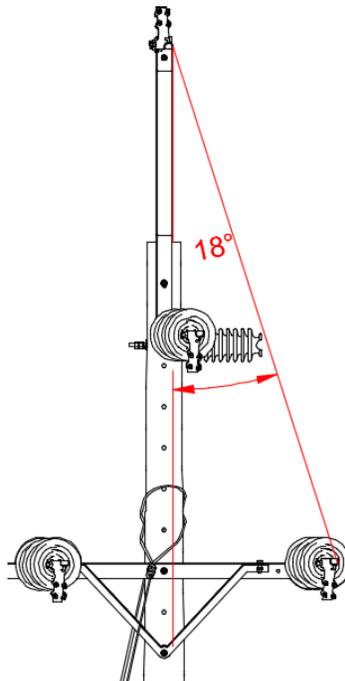
Posteriormente se considera el efecto del apantallamiento natural, de acuerdo con la caracterización de la zona el factor de apantallamiento natural S_f es 0,1, con lo que se calculan las descargas directas sobre la línea mediante la siguiente expresión:

$$N_s = N(1 - S_f)$$

$$N_s = 181(1 - 0.1) = 162.9 \approx 163 \text{ [descargas/100 km - año]}$$

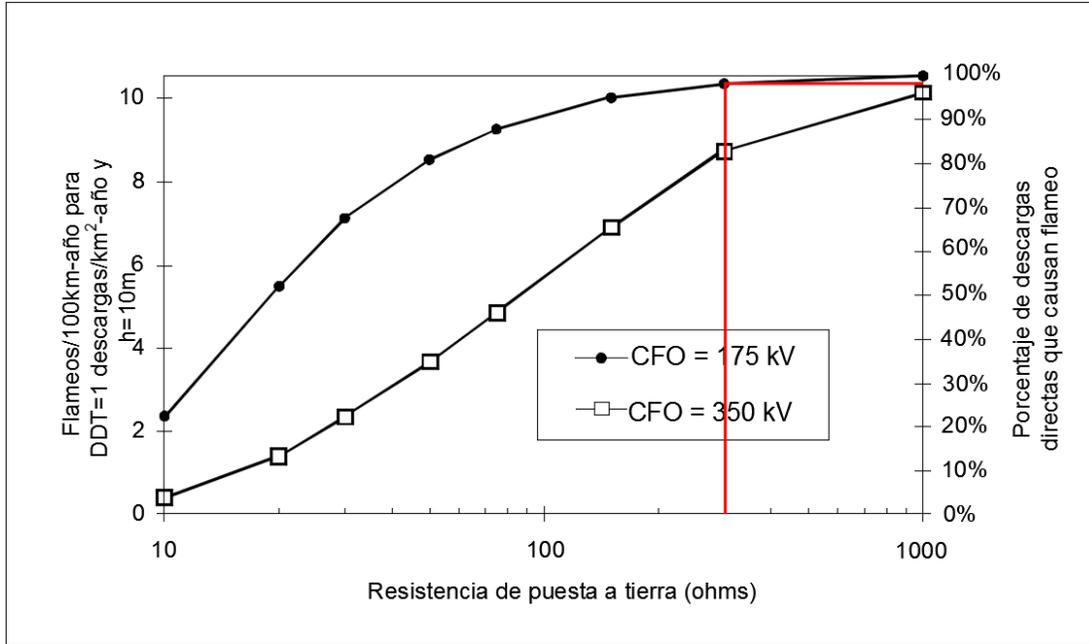
Debido a que la red de distribución de energía bajo análisis tiene cable de guarda con un ángulo de apantallamiento menor a 30° como se puede ver en la Figura 19, es posible asumir que la totalidad de las descargas atmosféricas directas impactarán sobre los cables de guarda y para determinar el porcentaje de descargas directas que producirían flameo se usa la Figura 14.

Figura 19 Ángulo de apantallamiento de la estructura NC-RA1-103



En la Figura 20 se muestra el análisis que se realizó para determinar el efecto del cable de guarda en la estructura NC-RA1-103.

Figura 20 Porcentaje de descargas directas que causan flameo en la estructura NC-RA1-103.



De acuerdo con la figura anterior el porcentaje de descargas directas que causa flameo para estructuras con CFO_{total} de 175 kV es 98%, en el caso de estudio el CFO_{total} de las estructuras es 179 kV, condición muy próxima al caso de referencia, por lo que se asume el mismo valor. Los impactos directos causan flameo se obtienen a continuación:

$$Tasa\ de\ flameos\ por\ descargas\ directas = 163 * 0.98 = 159.74 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

La longitud de la red de distribución de energía es 10 km, a partir de estos datos se obtiene el número de flameos por descargas directas:

$$Flameos\ por\ descargas\ directas = \frac{159.74 * 10}{100} = 15.97 \approx 16 \text{ [flameos - año]}$$

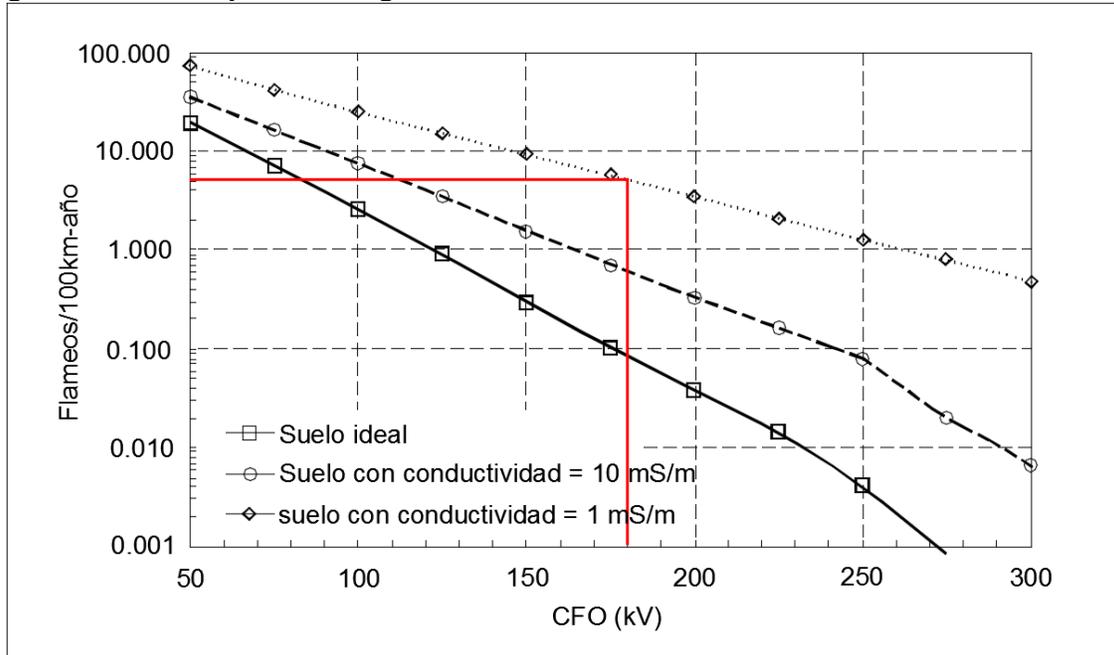
El análisis anterior muestra que el efecto del cable de guarda en la confiabilidad del sistema estudiado es prácticamente nulo debido a los altos valores que se tienen de resistencia de puesta a tierra, esto se tendrá en cuenta si se requieren implementar medidas para mejorar el desempeño de la red frente a rayos.

6.4.5 FLAMEOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRECTAS

El cálculo de la tasa de flameos producidos por descargas indirectas se realiza a partir de la Figura 7 con el CFO_{total} de la estructura de 179 kV que se calculó anteriormente. El valor de la resistividad del suelo en la zona de Puerto Berrío es de 1000 Ωm (de acuerdo con los datos de entrada), lo que equivale en una conductividad de 1 mS/m.

En la Figura 21 se muestra el análisis que se realizó para determinar el número de flameos por descargas indirectas.

Figura 21 Flameo por descargas indirectas en la estructura NC-RA1-103



Interceptando el CFO de 179 kV con la curva de conductividad del terreno de 1 mS/m se obtiene una tasa de flameos por descargas indirectas de 4 flameos /100 km-año. Este valor se debe escalar linealmente debido a que está normalizado para una densidad de descargas atmosféricas a tierra de 1 descarga /km²/año, por lo consiguiente y teniendo en cuenta el DDT en la zona de Puerto Berrío es de 14,4 descarga /km²/año, la tasa de flameos por descargas indirectas se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Tasa de flameos por descargas indirectas} = 4 * 14.4 = 57.6 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

De la misma forma que para las descargas directas se calcula el número de flameos por descargas indirectas:

$$\text{Flameos por descargas indirectas} = \frac{57.5 * 10}{100} = 5.76 \approx 6 \text{ [flameos - año]}$$

6.4.6 FLAMEOS TOTALES PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

El número total de flameos generados por descargas atmosféricas es la suma de los valores obtenidos por el efecto de rayos directamente sobre la red y en las proximidades de esta.

$$\text{Flameos}_{\text{Totales}} = \text{Flameos por descargas directas} + \text{Flameos por descargas indirectas}$$

$$\text{Flameos}_{\text{Totales}} = 16 + 6 = 22 \text{ [flameos - año]}$$

El número de salidas tolerables para el nivel de tensión III es de 11 salidas-año y como se mencionó en las generalidades de este documento las salidas son iguales a los flameos,

por lo tanto el sistema de distribución supera los límites permitidos y se deben implementar medidas para mejorar el desempeño de la red.

6.4.7 MEDIDAS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Durante el análisis anterior se detectaron los siguientes aspectos críticos para el buen funcionamiento del sistema de distribución considerado:

- El CFO_{total} de las estructuras es muy bajo para zonas con alta densidad de descargas a tierra como Puerto Berrío.
- El valor de la resistencia de puesta a tierra es excesivamente alto, por lo que el efecto del cable de guarda es prácticamente nulo.

Se considerarán dos alternativas para mejorar el desempeño de la red de distribución estudiada, la primera es reemplazar el aislador clase ANI 57-2 por un aislador polimérico clase ANSI clase 51-4F y así mejorar el CFO_{total} de las estructuras teniendo en cuenta que el flameo a través del aislador separador es la opción crítica. La otra solución planteada es mejorar los valores de las resistencias de puesta a tierra para que el efecto del cable de guarda sea más favorable.

6.4.7.1 Reemplazo de aislador clase ANI 57-2 por un aislador polimérico clase ANSI clase 51-4F

Se propone modificar el aislador de la estructura base por uno con las características que se muestran en la Figura 22.

Figura 22 Aislador clase ANSI 51-4F Gamma

Número de catálogo	PLO460011
Clase ANSI (C29.18)	51-4F
Distancias críticas, mm	
Distancia de arco	346
Distancia de fuga	978
Valores mecánicos	
SCL	12.4
MDCL	6.0
STL	22.2
Valores eléctricos, kV	
Tensión nominal	46
Flameo de baja frecuencia en seco	148
Flameo de baja frecuencia en húmedo	120
Flameo crítico al impulso positivo	250
Flameo crítico al impulso negativo	270

Radio influencia	
Tensión de prueba, kV	10
RIV máximo a 1000 kHz, μ V	4
Dimensiones según esquema	
Tamaño nominal de la rosca	3/4"

Fuente: <https://www.gamma.com.co/wp-content/uploads/2016/03/PL0460011.pdf>. 28 de agosto de 2019.

Este cambio implica recalcular el CFO_{total} de las estructuras considerando el aporte del nuevo aislador. Este cambio sólo modifica el CFO del camino 1.

Camino 1 (cable de guarda a la fase superior):

$$CFO_{total} = CFO_{pri}$$

$$CFO_{total} = 250 \text{ kV}$$

Para los caminos restantes el cálculo es idéntico al de la estructura base.

En la Tabla 4 se muestran los resultados del cálculo del CFO_{total} de la estructura NC-RA1-103 con la mejora propuesta.

Tabla 4 CFO_{total} de la estructura NC-RA1-103 con mejora 1

De	A	Camino de arco	CFO total (kV)
Cable de guarda	Fase superior	Aislador clase ANSI 57-2 (179 kV)	250
Fase derecha	Bajante de puesta a tierra	Cadena de aisladores clase ANSI 52-4 (340 kV)	340
Cable de guarda	Fase superior	Longitud de distancia de aislamiento en aire (900 kV)	900
Fase derecha	Fase superior	Cadena de aisladores clase ANSI 52-4 (340 kV) Aislador clase ANSI 57-2 (80.55)	420,55

Con esta nueva configuración el CFO_{total} de las estructuras es 250 kV y se realizan nuevamente los cálculos por salidas directas e indirectas.

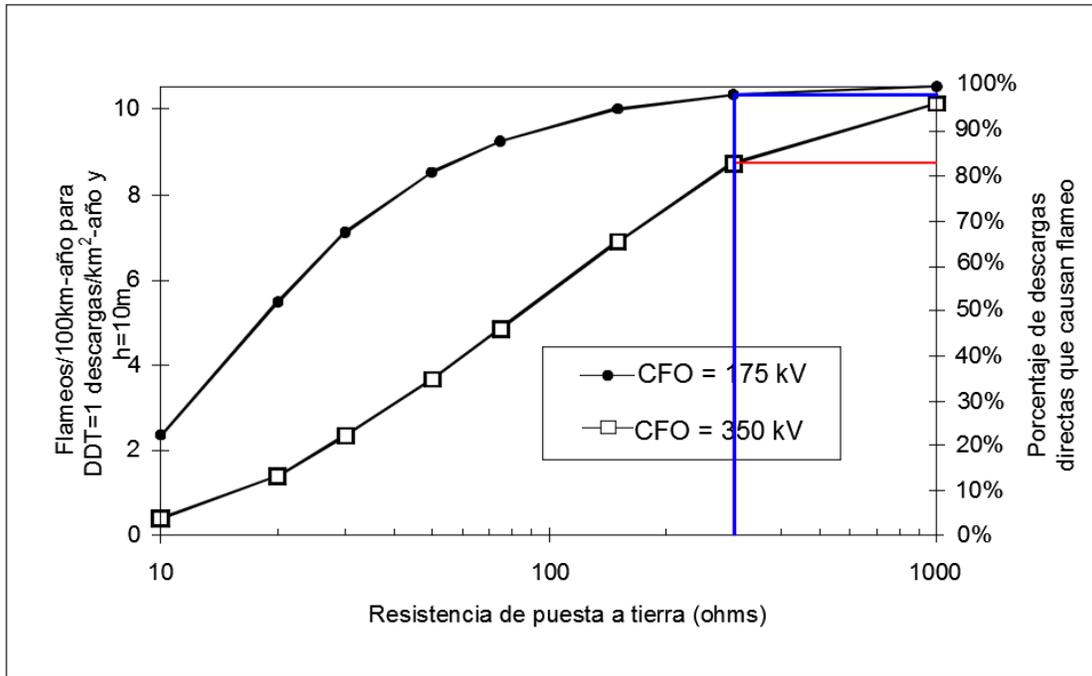
- **Flameos producidos por descargas atmosféricas directas**

La tasa de descargas atmosféricas que indiquen directamente sobre la red depende de las dimensiones de las estructuras y del factor de apantallamiento, por lo que el resultado de ese cálculo no se altera por el cambio de cruceta.

$$N_s = 181(1 - 0.1) = 162.9 \approx 163 \text{ [descargas/100 km - año]}$$

En la Figura 23 se muestra el análisis que se realizó para determinar el porcentaje de descargas que causan flameo por descargas directas.

Figura 23 Porcentaje de descargas directas que causan flameo en la estructura NC-RA1-103 mejora 1



De acuerdo con la figura anterior el porcentaje de descargas directas que causa flameo en estructuras con CFO_{total} de 175 kV es del 98%, mientras que con un CFO_{total} de 350 kV es del 83%, la estructura estudiada tiene un CFO_{total} de 250 kV por lo que se realiza una interpolación para definir el porcentaje de descargas directas que causan flameo.

Tabla 5 Interpolación para cálculo de flameo por descargas directas mejora 1

CFO_{total}	% de descargas directas que causan flameo
175	0.98
250	X
380	0.83

$$\Delta_{CFO_{total-1}} = 380 - 175 = 205$$

$$\Delta_{porcentajes-1} = |0.83 - 0.98| = 0.15$$

$$\Delta_{CFO_{total-2}} = 380 - 250 = 130$$

$$\Delta_{CFO_{total-2}} = \frac{0.15 * 130}{205} = 0.095$$

$$\% \text{ de descargas directas que causan flameo para } 250 \text{ kV} = 0,83 + 0,095 = 0,925$$

Con el porcentaje estimado de descargas directas que causan flameo se calcula la tasa de flameos de la siguiente forma:

$$Tasa \text{ de flameos por descargas directas} = 163 * 0.925 = 151 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

La longitud de la red de distribución de energía es 10 km, a partir de estos datos se obtiene el número de flameos por descargas directas:

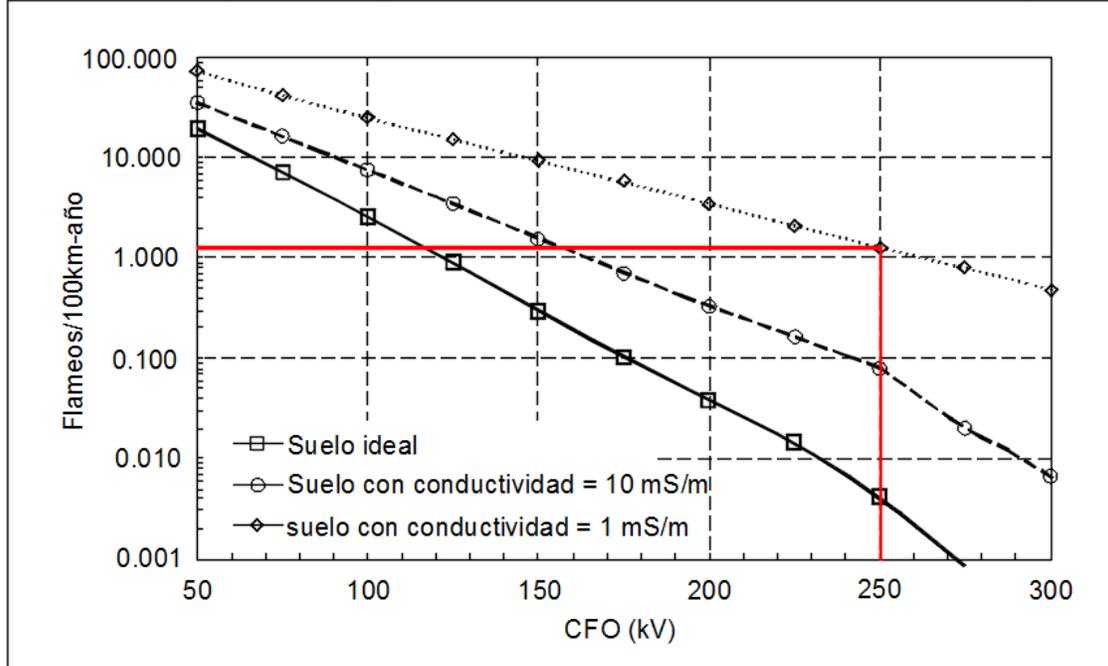
$$\text{Flameos por descargas directas} = \frac{151 * 10}{100} = 15.1 \approx 15 \text{ [flameos - año]}$$

Aumentar el CFO_{total} de las estructuras reemplazando el aislador separador cerámico por uno polimérico, mejora levemente el número de flameos por descargas directas. Sin embargo, es evidente que el alto valor de las resistencias de puesta a tierra sigue siendo un factor determinante que limita el nivel de protección del cable de guarda.

- **Flameos producidos por descargas atmosféricas indirectas**

De nuevo se realiza el cálculo de la tasa de flameos producidos por descargas indirectas con el CFO_{total} de la estructura de 250 kV, el análisis se muestra en la Figura 24.

Figura 24 Flameo por descargas indirectas en la estructura NC-RA1-103 mejora 1



El valor obtenido de la gráfica es de 1,1 [flameos / 100 km - año], ajustando el valor para el DDT de Puerto Berrío se tiene:

$$\text{Tasa de flameos por descargas indirectas} = 1.1 * 14.4 = 15.84 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

De la misma forma que para las descargas directas se calcula el número de flameos por descargas indirectas:

$$\text{Flameos por descargas directas} = \frac{15.84 * 10}{100} = 1.584 \approx 2 \text{ [flameos - año]}$$

Se evidencia que el efecto del cambio de aislador es más significativo frente a descargas indirectas que directas.

- **Flameos totales producidos por descargas atmosféricas**

El número total de flameos generados por descargas atmosféricas es la suma de los valores obtenidos por el efecto de rayos directamente sobre la red y en las proximidades de esta.

$$Flameos_{Tota\text{les}} = Flameos \text{ por descargas directas} + Flameos \text{ por descargas indirectas}$$

$$Flameos_{Tota\text{les}} = 15 + 2 = 17 \text{ [flameos - año]}$$

Con la mejora implementada el número de salidas generadas por descargas atmosféricas es de 17 salidas - año. Este valor no se encuentra dentro del límite de 11 salidas - año por lo que se deben considerar otras mejoras.

De esta forma, se evaluará el desempeño de la red con el segundo caso propuesto. Se mejorará la resistencia de puesta a tierra manteniendo el cambio en el aislador debido a que sólo implementado la primera medida no se cumple con el límite máximo de salidas permitidas.

6.4.7.2 Mejorar la resistencia de puesta a tierra en el sistema de distribución

Con esta alternativa se propone mejorar las características de los sistemas de puesta a tierra, alcanzando valores de resistencia de puesta a tierra a 20 Ω , que corresponde a lo recomendado por el RETIE [1].

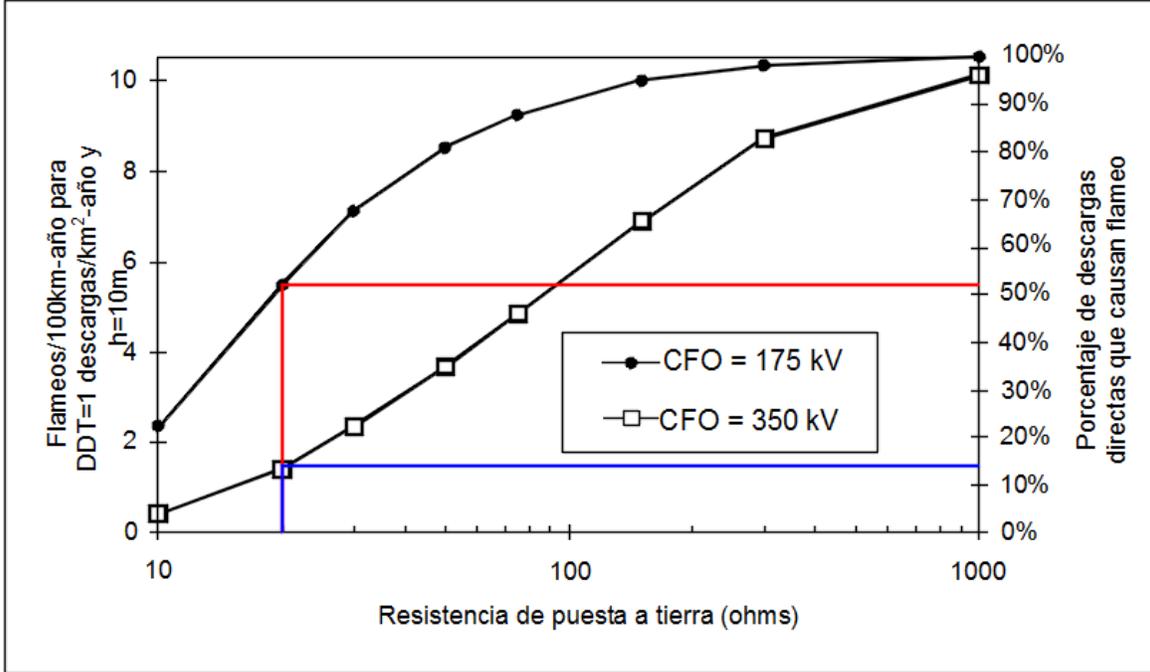
- **Flameos producidos por descargas atmosféricas directas**

La tasa de descargas atmosféricas que indiquen directamente sobre la red depende de las dimensiones de las estructuras y del factor de apantallamiento, por lo que el resultado de ese cálculo no se altera con respecto a las alternativas anteriores.

$$N_s = 181(1 - 0.1) = 162.9 \approx 163 \text{ [descargas/100 km - año]}$$

En la Figura 25 se muestra el análisis que se realizó para determinar el porcentaje de descargas directas que producirían flameo con un valor de resistencia de puesta a tierra de 20 Ω .

Figura 25 Porcentaje de descargas directas que causan flameo en la estructura NC-RA1-103 mejora 2.



De acuerdo con la figura anterior el porcentaje de descargas directas que causa flameo en estructuras con CFO_{total} de 175 kV es del 52%, mientras que con un CFO_{total} de 350 kV es del 14%, la estructura estudiada tiene un CFO_{total} de 250 kV por lo que se realiza una interpolación para definir el porcentaje de descargas directas que causan flameo.

Tabla 6 Interpolación para cálculo de flameo por descargas directas mejora 2

CFO_{total}	% de descargas directas que causan flameo
175	0.52
250	X
380	0.14

$$\Delta_{CFO_{total-1}} = 380 - 175 = 205$$

$$\Delta_{porcentajes-1} = |0.14 - 0.52| = 0.38$$

$$\Delta_{CFO_{total-2}} = 380 - 250 = 130$$

$$\Delta_{CFO_{total-2}} = \frac{0.38 * 130}{205} = 0.241$$

$$\% \text{ de descargas directas que causan flameo para } 250 \text{ kV} = 0,14 + 0,241 = 0,381$$

Se obtiene que el porcentaje de descargas directas que causa flameo es del 38,1%, de esta forma se estima la tasa de flameos por descargas directas de la siguiente forma:

$$Tasa \text{ de flameos por descargas directas} = 163 * 0.381 = 62.103 \text{ [flameos/100 km - año]}$$

La longitud de la red de distribución de energía es 10 km, a partir de estos datos se obtiene el número de flameos por descargas directas:

$$\text{Flameos por descargas directas} = \frac{62.103 * 10}{100} = 6.21 \approx 7 \text{ [flameos - año]}$$

Se evidencia que mejorar la resistencia de puesta a tierra reduce significativamente las salidas por impactos directos porque permite que el cable de guarda sea funcional.

- **Flameos producidos por descargas atmosféricas indirectas**

La estimación de las salidas por descargas atmosféricas indirectas se realiza a partir de la conductividad del terreno y del CFO de la estructura, mejorar la resistencia de puesta a tierra no altera el cálculo con respecto al que se realizó en la primera alternativa, por lo que el resultado es el mismo.

$$\text{Flameos por descargas indirectas} = \frac{15.84 * 10}{100} = 1.584 \approx 2 \text{ [flameos - año]}$$

- **Flameos totales producidos por descargas atmosféricas**

El número total de flameos generados por descargas atmosféricas es la suma de los valores obtenidos por el efecto de rayos directamente sobre la red y en las proximidades de esta.

$$\text{Flameos}_{\text{Totales}} = \text{Flameos por descargas directas} + \text{Flameos por descargas indirectas}$$

$$\text{Flameos}_{\text{Totales}} = 7 + 2 = 9 \text{ [flameos - año]}$$

Con la mejora implementada el número de salidas generadas por descargas atmosféricas es de 9 salidas - año. Este valor se encuentra dentro del límite de 11 salidas - año por lo que en este escenario se tiene una mejora efectiva.

6.4.7.3 Mejora por implementar

Una vez se plantean las alternativas y se define si estas son o no efectivas para mantener el número de salidas de la red dentro de los parámetros tolerables, se debe hacer una evaluación integral del costo de implementar cada una de las soluciones viables y seleccionar la que implique la menor inversión.

La evaluación integral debe considerar el costo del suministro, transporte e instalación de los elementos que conforman la mejora propuesta, así como considerar posibles pagos por desconexión de las redes para efectuar los trabajos. El alcance de la presente guía no incluye el análisis económico, por lo que no se presenta el costo asociado a las mejoras propuestas en el ejemplo.

7 ANEXOS

Anexo A Sistema integral de protección contra rayos para edificaciones

- **Evaluación de riesgo en edificaciones**

La evaluación del nivel de riesgo asociado a edificaciones en los sistemas de distribución de energía eléctrica se debe realizar con base en la metodología expuesta en la Norma Técnica Colombiana 4552-2 [2]. Para realizar el análisis se debe disponer de la siguiente información:

- Densidad promedio de descargas a tierra – DDT (Ver documento Caracterización de parámetros meteorológicos [6]).
- Características de la estructura considerada (dimensiones y uso).
- Sistemas eléctricos al interior de la edificación (acometida eléctrica y dispositivos de protección interna).
- Condiciones de entorno (objetos y/o estructuras alrededor).

El análisis propuesto se enfoca en evaluar las componentes de riesgo a partir de la siguiente ecuación básica:

$$R_x = N_x * P_x * L_x \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

R_x : es la componente de riesgo
 N_x : número de eventos peligrosos
 P_x : probabilidad de daño
 L_x : pérdida consecuente

Los componentes de riesgo (R_x) que se podrían presentar sobre la estructura son los siguientes:

- Riesgo de pérdida de vidas humanas
- Riesgo de pérdida de servicios a público
- Riesgo de pérdida de patrimonio cultural
- Riesgo de pérdida de valor económico

Para mayor detalle se recomienda consultar la Norma Técnica Colombiana 4552-2 [2].

- **Protección de edificaciones**

Las características del SIPRA de edificaciones están dadas por la clase de protección requerida de acuerdo con el análisis de riesgo realizado. En esta sección se dan lineamientos generales sobre los sistemas de protección a implementar de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 4552-2 [2].

- **Sistema de protección externo**

El sistema de protección externo se instala para recibir y conducir a tierra (en condiciones seguras para las personas y la instalación) las descargas atmosféricas que se dirigirían directamente a la estructura [2].

El sistema de protección externo se compone de:

- Elementos de captación (bayonetas, cables colgantes o mallas conductoras)
- Bajantes (diseñadas de acuerdo con la Guía técnica de puesta a tierra GT-08)
- Sistema de puesta a tierra (diseñado de acuerdo con la Guía técnica de puesta a tierra GT-08)

Para el diseño del sistema de protección externa existen tres métodos comunes: el de las esferas rodantes (aplicable a estructuras de hasta 55 m), el del ángulo de protección (útil para estructuras con formas simples y con alturas considerables) y el de enmallado (empleado para edificaciones con techos planos y no aptos para el tránsito de personas).

- **Método de las esferas rodantes**

Es el método más común y apropiado para el tipo de edificaciones que se encuentran en los sistemas de distribución (subestaciones, cuartos eléctricos, armarios, entre otros) es el de las esferas rodantes. A continuación, se profundiza en su aplicación.

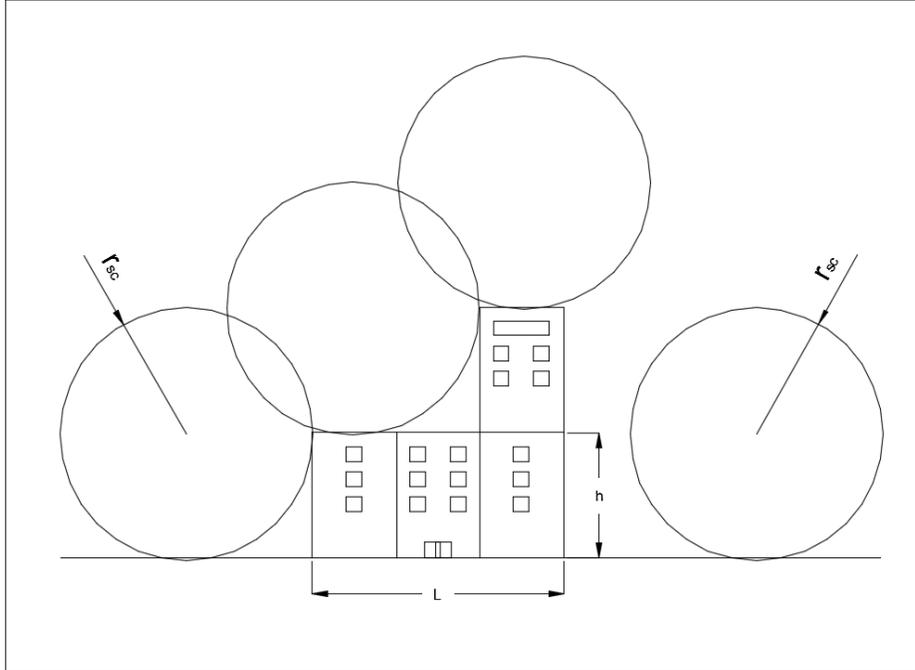
El método consiste en rotar una esfera imaginaria sobre la estructura en todas las direcciones (método tridimensional). Se debe partir de un punto arbitrario (una de las esquinas de la estructura considerada). Los lugares donde la esfera toque la estructura representan áreas desprotegidas y cuando esto ocurra se debe agregar una punta de captación que sirva de apoyo a la esfera. El radio de la esfera dependerá del nivel de protección requerido (ver Tabla 7).

Las puntas de captación deben quedar instalados en las esquinas de la edificación, sobre puntos sobresalientes y/o bordes irregulares y siempre disponer de una altura libre de al menos 25 cm por encima del punto más alto de la estructura.

Tabla 7 Valores límite del radio de la esfera rodante de acuerdo con el nivel de protección [2]

Nivel de protección	Radio de la esfera (m)
Nivel I	35
Nivel II	40
Nivel III	50
Nivel IV	55

En la Figura 26 se muestra un ejemplo gráfico de aplicación del método de las esferas rodantes en una de las direcciones posibles.

Figura 26 Método de las esferas rodantes [2]

Para mayor detalle se recomienda consultar la Norma Técnica Colombiana 4552-2 [2].

- **Sistema de protección interno**

El sistema de protección interno se diseña para evitar que ocurran descargas eléctricas nocivas al interior de la estructura durante la disipación de las corrientes del rayo.

El sistema de protección interno se compone de:

- Uniones equipotenciales del SIPRA.
- Aislamiento eléctrico por medio de dispositivos de protección contra sobrecorriente (DPS).

Para mayor detalle se recomienda consultar la Norma Técnica Colombiana 4552-2 [2].