REV	Fecha	Descripción de la Revisión	ELAB.	VERIF.	APROB.
00	17/04/2026	VALIDO PARA CONSTRUCCIÓN	CAG	VAG	JSB
0F	07/04/2026	ATENCIÓN A COMENTARIOS	CAG	VAG	JSB
0E	27/03/2026	ATENCIÓN A COMENTARIOS	CAG	VAG	JSB
0D	04/03/2026	ATENCIÓN A COMENTARIOS	CAG	VAG	JSB
0C	11/02/2026	ATENCIÓN A COMENTARIOS	CAG	VAG	JSB

El Campano Solar S.A.S E.S.P

J.E. JAIMES INGENIEROS

ieb

PROYECTO:

PFV EL CAMPANO

ÁREA:

LÍNEA DE TRANSMISIÓN

TÍTULO:

MEMORIA DE SELECCIÓN DE AISLAMIENTO

FECHA:	ELABORADO:	VERIFICIADO:	APROBADO:
17/04/2026	Cesar A. Giraldo AN205-160718	Vladimir A. Gaviria AN205-166422	Juan S. Botero AN205-94186

Nº DE DOCUMENTO:	REVISIÓN	PÁGINA
CAM-LT-ELM-IN-005	00	**1** de **51**

ÍNDICE

1 OBJETIVO 5
2 ALCANCE 5
3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 5
4 INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO 6
5 INFORMACIÓN GENERA DEL SISTEMA ELÉCTRICO 6
6 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS 6
7 CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO 7
8 INFORMACIÓN DE ENTRADA 7
9 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE AISLAMIENTO 11
9.1 AISLADORES 11
9.1.1 FACTORES METEOROLÓGICOS DE CORRECCIÓN DE AISLAMIENTO 11
9.1.2 FACTORES DE CORRECCIÓN EFECTO DE LA ALTURA 11
9.1.3 NIVEL DE CONTAMINACIÓN 12
9.1.4 FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA DISTANCIA DE FUGA 13
9.1.5 AISLAMIENTO A FRECUENCIA INDUSTRIAL 14
9.1.6 AISLAMIENTO FRENTE A SOBRETENSIONES DE MANIOBRA 16
9.1.7 AISLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 18
9.1.8 DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA 22
10 RESULTADOS SELECCIÓN DE AISLAMIENTO 22
10.1 CÁLCULO DE FACTORES METEOROLÓGICOS DE CORRECCIÓN DE AISLAMIENTO 22
10.2 CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCIÓN EFECTO DE LA ALTITUD 23
10.3 CÁLCULO DE AISLAMIENTO A FRECUENCIA INDUSTRIAL 23
10.4 CÁLCULO DEL AISLAMIENTO FRENTE A SOBRETENSIONES DE MANIOBRA 23
10.5 CÁLCULO AISLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 24
10.5.1 CÁLCULO DE DISTANCIA DE AIRE SECO PARA AISLADORES 25
10.5.2 ÁNGULOS DE BALANCEO 26
10.5.3 MÁXIMO ÁNGULO DE DEFLEXIÓN 32
11 AISLADORES SUMINISTRADOS 33
11.1 VALIDACIÓN DE LOS AISLADORES 34
12 CONCLUSIONES DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO 36
13 ANEXO 1 SIMULACIONES DE SALIDAS POR RAYO 38
14 REFERENCIAS 51

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización de línea de conexión parque solar Campano 230/34,5kV – subestación Chinú a 230 kV 5
Figura 2. Siluetas de estructuras proyectadas 9
Figura 3. Valor de S respecto del valor del CFOc 12
Figura 4.Selección de nivel de contaminación 13
Figura 5. Selección de factor RUSCD [8] 13
Figura 6. Selección de factor m [9] 14
Figura 7. Distribución de sobrevoltajes fase-tierra EPRI. 17
Figura 8. Factor Gap para distancias en aire 18
Figura 9. Modelo electrogeométrico IEEE 1243 20
Figura 10. Geometría ángulos de balanceo 26
Figura 11. Ángulos de balanceo estructura tipo A 28
Figura 12. Ángulos de balanceo considerados para los casos 1 y 2 para espaciamiento entre conductor y apoyo 29
Figura 13. Ángulos de balanceo considerados para los casos 1 y 2 para espaciamiento entre conductores de fase a mitad de vano 30
Figura 14.Restricción física de los herrajes y aisladores, para los balanceos. 32
Figura 15. Aislador polimérico SHERMAN 24SM512681 33

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.Coordenadas del proyecto 5
Tabla 2. Información general del proyecto 6
Tabla 3. Características del sistema eléctrico 6
Tabla 4. Parámetros meteorológicos [1] 6
Tabla 5. Conductor de fases [3] 7
Tabla 6. Cables de guarda [4] 8
Tabla 7. Coordenadas estructuras de suspensión, retención y terminal. 10
Tabla 8. Resistencia de puesta a tierra [5] 10
Tabla 9.Ambientes típicos 12
Tabla 10. Factores de corrección de la distancia de fuga 14
Tabla 11. Factores de corrección efecto de la altitud 23
Tabla 12. Cálculo de aislamiento a frecuencia industrial 23
Tabla 13. Cálculo de aislamiento para sobretensiones de maniobra 24
Tabla 14. Distancias en aire fase – tierra, fase-fase para sobretensiones por descargas atmosféricas 25
Tabla 15. Número de salidas por 100 km-año para la línea a 230 kV 25
Tabla 16. Ángulos de balanceo 28
Tabla 17. Coordinación de la posición con los esfuerzos eléctricos a soportar 29
Tabla 18. Valores máximos para cada caso de carga. 31
Tabla 19. Cálculo ángulos de balanceo fase – tierra, fase-fase 31
Tabla 20. Ángulos de balanceo fase - tierra 31
Tabla 21. Ángulos de balanceo fase – fase 31
Tabla 22. Ángulos de deflexión y longitud de alargadera para cadena de retención 32
Tabla 23. Máximo ángulo de deflexión sin cadena estabilizadora 33
Tabla 24. Características Aislador polimérico SHERMAN 24SM512681. 34
Tabla 25. Verificación aislador propuesto J.E. Jaimes. 34

Tabla 26. Características del aislador polimérico – Cadena de suspensión y retención 36
Tabla 27. Distancias de aislamiento 36
Tabla 28.Resumen de coordinación de aislamiento.....36

1 OBJETIVO

El objeto de este documento es presentar la memoria de coordinación de aislamiento, para la línea de transmisión a 230 kV, para la subestación Elevadora parque solar Campano en 230/34,5 kV.

2 ALCANCE

El alcance de este documento comprende la memoria de coordinación de aislamiento, las distancias eléctricas y apantallamiento, para el desarrollo del diseño de la línea de transmisión a 230 kV, incluyendo aisladores para el pórtico de llegada y barras de este, para la subestación Elevadora parque solar Campano en 230/34,5 kV.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La línea de transmisión aérea a 230 kV entre la subestación elevadora del parque solar Campano y la subestación Chinú, cuenta con una longitud aproximada de 3,8 km aproximadamente. Esta línea tendrá una capacidad de 99,9 MW, que corresponde a la potencia pico que podrá ser generada por el parque solar Campano 230/34,5 kV.

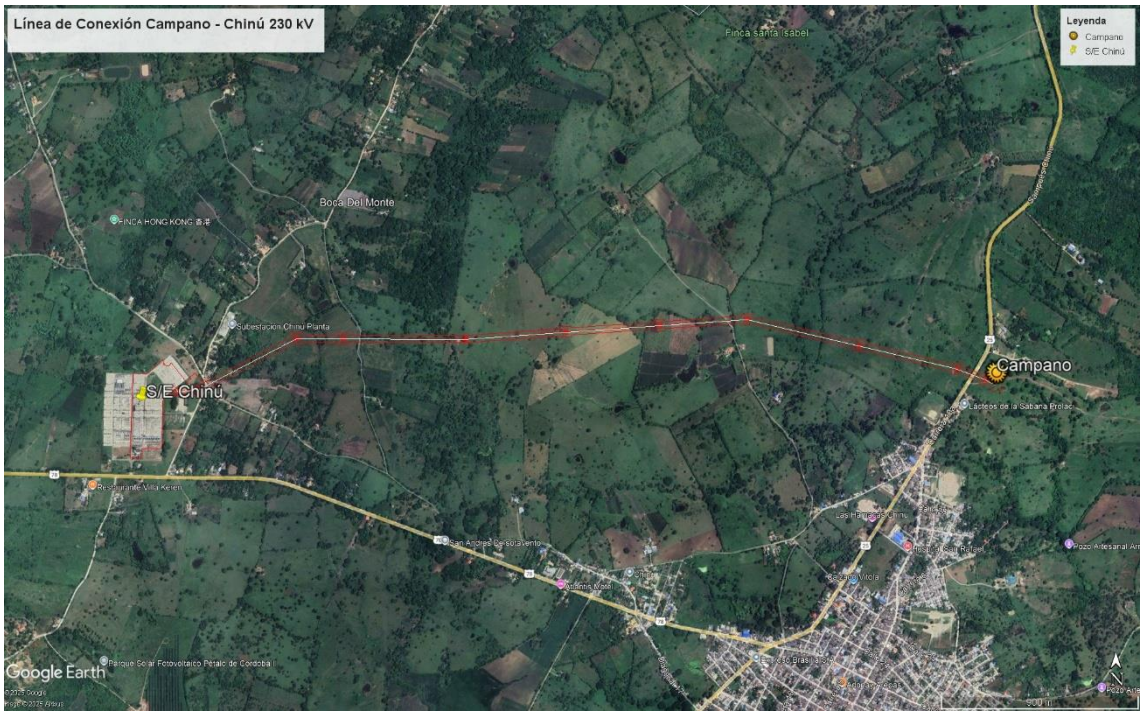


Figura 1. Localización de línea de conexión parque solar Campano 230/34,5kV – subestación Chinú a 230 kV

En la Tabla 1 se presentan las coordenadas aproximadas de la ubicación geográfica del proyecto.

Tabla 1.Coordenadas del proyecto

Subestación	Coordenadas de localización de pórticos			
	MAGNA Colombia Bogotá		Magna Origen Único Nacional	
	Norte	Este	Norte	Este
Campano 230 kV	1500707,52	855541,489	2566789,63	4737250,128
Chinú 230 kV	1500731,94	851913,200	2566824,87	4733622,646

4 INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La información general del proyecto se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Información general del proyecto

Nombre de la línea	Campano – Chinú
Tensión del sistema	230 kV
Altura sobre el nivel del mar	115 m.s.n.m
Potencia	99,9 MW
Localización	Departamento de Córdoba, municipio Chinú

5 INFORMACIÓN GENERA DEL SISTEMA ELÉCTRICO

La información general del sistema eléctrico se muestra en la Tabla 3

Tabla 3. Características del sistema eléctrico

Número de circuitos	1
Número de cables de guarda	2
Número de conductores por fase	1
Tensión de operación del sistema	230 kV
Tensión máxima de operación	245 kV
Frecuencia asignada	60 Hz
Tipo de puesta a tierra	Sólido
Identificación de fases	R, S, T

6 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Los parámetros meteorológicos para el diseño de la línea de conexión serán los indicados en el documento [1]. Las unidades para los parámetros meteorológicos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros meteorológicos [1]

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura máxima (Tmáx)	ºC	39,64
Temperatura máxima anual promedio (Tprom)	ºC	36,80
Temperatura media anual (EDS)	ºC	27,31
Temperatura mínima anual promedio (Coincidente)	ºC	20,05
Temperatura mínima (Tmín)	ºC	17,64
Altura sobre el nivel del mar promedio para la línea	m	115
Velocidad máxima del viento	km/h	80

Parámetro	Unidad	Valor
Velocidad máxima promedio del viento	km/h	48
Velocidad de viento equivalente de diseño	km/h	80
Velocidad de viento de diseño	km/h	80
Densidad relativa del aire	kg/m^3	0,613
Densidad de Descargas a Tierra - DDT	Rayos /km² -año	13
Nivel de contaminación	-	liviano
Distancia de fuga unificada (USCD)	mm/kV	27,8
Latitud geográfica	grados	9,12
Humedad relativa	%	79,05
Presión de viento	Pa	293,50

7 CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO

Los criterios que serán utilizados para la selección del aislamiento de la línea comprenden los siguientes aspectos:

- De acuerdo con la Resolución CREG 098 de 2000 [2] se considera como parámetro de diseño un límite máximo de tres (3) salidas por cada 100 km de línea / año ante descargas eléctricas atmosféricas y servicio continuo permanente ante sobre-tensiones de frecuencia industrial.
- Para las salidas por sobretensiones tipo maniobra se establece un requisito de (1) falla por cada 100 operaciones de maniobra de la línea.
- Factores meteorológicos con corrección para el aislamiento.
- Factores de correcciones por efecto de la altitud
- Cálculo del aislamiento a frecuencia industrial
- Cálculo del aislamiento contra sobretensiones por maniobra
- Cálculo del aislamiento contra descargas atmosféricas
- No se consideran ángulos de balanceo debido a que la línea de conexión no tendrá torres en suspensión.

8 INFORMACIÓN DE ENTRADA

- Parámetros ambientales del sitio: Se tomaron las características indicadas en la Tabla 4.
- Características del sistema eléctrico: Las características del sistema eléctrico son las señaladas en la Tabla 3.
- Conductor de fases y cables de guarda: las características de los cables utilizados para la línea de transmisión se presentan en la Tabla 5 y Tabla 6, tomados de los documentos CAM-LT-ELM-MC-003 [3] y CAM-LT-ELM-MC-004 [4].

Tabla 5. Conductor de fases [3]

Características	Unidad	Valor
Tipo		ACAR
Denominación		ACAR 650
Calibre	kcmil	650
Número alambres aluminio 1350 - H19		18
Número alambres de aleación de aluminio 6201-T81		19
Diámetro nominal de los alambres aluminio	mm	3,37

Características	Unidad	Valor
Diámetro exterior nominal conductor	mm	23,57
Resistencia AC del conductor a 75°C	(Ω/km)	0,114
Resistencia DC del conductor a 20°C	(Ω/km)	0,096
Peso unitario nominal	kg/m	0,906
Resistencia mínima a la rotura	kgf	7537
Módulo de elasticidad	kgf/mm^2	5403
Coeficiente de dilatación lineal	(1/100°C)	23,04E-06

Tabla 6. Cables de guarda [4]

Característica	Unidad	Comunicaciones y protección
Tipo	sin	OPGW
Denominación	sin	OPGW 48 F.O.
Número de hilos	Un	-
Número de fibras ópticas	Un	48
Diámetro nominal de los hilos	mm	-
Diámetro total	mm	16,4
Sección total	mm^2	--
Peso	kg/m	0,757
Tensión de rotura	kgf	11384 máximo
Resistencia DC a 20°C	Ω/km	---
Capacidad térmica I^2t	kA^2s	41 (mínimo)

- Disposición de las estructuras: La disposición física de las estructuras, la cual se verificará mediante la coordinación de aislamiento es la descrita en la Figura 2.

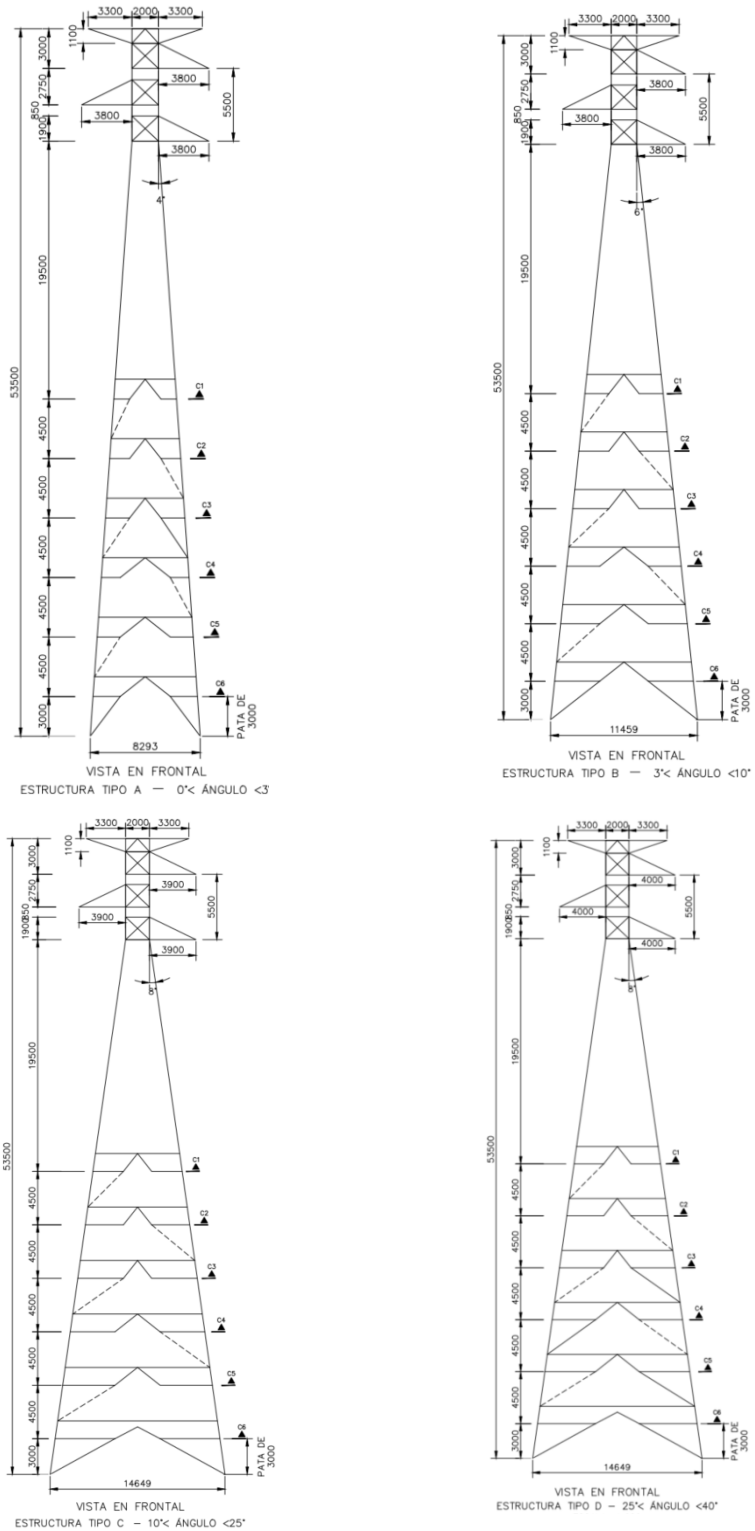


Figura 2. Siluetas de estructuras proyectadas

- A continuación, se detalla las coordenadas de las estructuras.

Tabla 7. Coordenadas estructuras de suspensión, retención y terminal.

Estructura - Tipo	Coordenadas Y				Coordenadas X		
	Guarda	Fase1	Fase2	Fase 3	Fase1	Fase2	Fase 3
Pórtico Chinú 230	20,000	17,500	17,500	17,500	-4	0	4
TC -D	35,500	32,500	29,750	27,000	5	-5	5
T1 -C	53,500	50,500	47,750	45,000	4,9	-4,9	4,9
T2-D	53,500	50,500	47,750	45,000	5	-5	5
T3-A	49,000	43,266	40,516	37,766	4,8	-4,8	4,8
T4-B	40,000	37,000	34,250	31,500	4,8	-4,8	4,8
T5 -A	40,000	34,266	31,516	28,766	4,8	-4,8	4,8
T6-A	49,000	43,266	40,516	37,766	4,8	-4,8	4,8
T7-C	44,500	41,500	38,750	36,000	4,9	-4,9	4,9
T8-A	40,000	34,266	31,516	28,766	4,8	-4,8	4,8
T9-B	35,500	32,500	29,750	27,000	4,8	-4,8	4,8
T10-D	35,500	32,500	29,750	27,000	5	-5	5

Los guardas para todas las estructuras se encuentran ubicados en las coordenades X 4,3 y -4,3

- Las resistencias de puesta a tierra que se utilizaran para el análisis son tomadas del documento "Memoria de diseño de puestas a tierra" [5], se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resistencia de puesta a tierra [5]

Estructura	RPT(Ω)
TC	2,233
T1	2,233
T2	2,233
T3	3,084
T4	2,190
T5	3,072
T6	3,084
T7	2,230
T8	3,084
T9	2,190
T10	2,233

9 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE AISLAMIENTO

9.1 AISLADORES

A continuación, se presenta una descripción de la metodología de cálculo considerada para la ejecución del diseño de coordinación y selección de aislamiento de la línea.

Estos resultados serán válidos para los aisladores que serán utilizados en la línea de trasmisión, en el pórtico de llegada y barras de la subestación.

9.1.1 FACTORES METEOROLÓGICOS DE CORRECCIÓN DE AISLAMIENTO

Los factores meteorológicos de corrección de aislamiento, no se presentan en la versión E de este documento, dado a que no se requieren para la metodología presentada en la misma.

9.1.2 FACTORES DE CORRECCIÓN EFECTO DE LA ALTURA

De acuerdo con lo establecido en el documento IEEE 1313.2 [6], el factor de corrección por condiciones atmosféricas para maniobra entre fase y estructura k_{a_sf}, se define como:

$$k_{a_sf} = \delta^{m}$$

Donde:

δ: Densidad relativa del aire, se calcula de la siguiente manera:

$$\delta = e^{-\frac{A}{8{,}59}}$$

Donde A es la altitud sobre el nivel del mar en km.

m: corresponden a constante que dependen de electrodos, del tipo y la polaridad del impulso, para sobretensiones de frente lento, se calcula de la siguiente manera, con base a la IEEE 1313.2 [6] en su ecuación 15, se tiene:

$$m = 1{,}25 G_0 (G_0 - 0{,}2)$$

Donde:

$$G_0 = \frac{V_S}{500S}$$

Con Vs ≈ CFO.

Donde S corresponde a la distancia de aislamiento en aire en metros, de acuerdo con la Figura 5.11-3 de la referencia [7], que se muestra en la Figura 3.

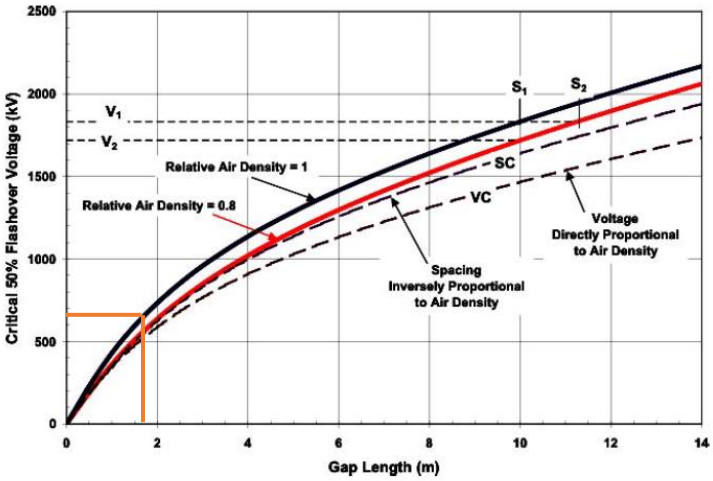


Figure 5.11-3 Critical 50% flashover voltage of rod-plane gaps. Top curve for δ_r =1. Bottom curve for δ_r =0.8.

Figura 3. Valor de S respecto del valor del CFOc

Se toma S como un valor aproximado de 1.75 m

9.1.3 NIVEL DE CONTAMINACIÓN

Para definir el nivel de contaminación aplicable para el proyecto, se utilizará la metodología establecida en la norma IEC 60815-1 "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles" [8], mediante la metodología cualitativa, en la cual se selecciona este parámetro mediante los ambientes típicos establecidos en la Tabla 9.

Tabla 9.Ambientes típicos

Example	Description of typical environments
E1	> 50 km[a] from any sea, desert, or open dry land > 10 km from man-made pollution sources[b] Within a shorter distance than mentioned above of pollution sources, but: • prevailing wind not directly from these pollution sources • and/or with regular monthly rain washing
E2	10-50 km[a] from the sea, a desert, or open dry land 5-10 km from man-made pollution sources[b] Within a shorter distance than E1 from pollution sources, but: • prevailing wind not directly from these pollution sources • and/or with regular monthly rain washing
E3	3-10 km[c] from the sea, a desert, or open dry land 1-5 km from man-made pollution sources[b] Within a shorter distance than mentioned above of pollution sources, but: • prevailing wind not directly from these pollution sources • and/or with regular monthly rain washing
E4	Further away from pollution sources than mentioned in E3, but: • dense fog (or drizzle) often occurs after a long (several weeks or months) dry pollution accumulation season • and/or heavy, high conductivity rain occurs • and/or there is a high NSDD level, between 5 and 10 times the ESDD
E5	Within 3 km[c] of the sea, a desert, or open dry land Within 1 km of man-made pollution sources[b]
E6	With a greater distance from pollution sources than mentioned in E5, but: • dense fog (or drizzle) often occurs after a long (several weeks or months) dry pollution accumulation season • and/or there is a high NSDD level, between 5 and 10 times the ESDD
E7	Within the same distance of pollution sources as specified for "heavy" areas and: • directly subjected to sea-spray or dense saline fog • or directly subjected to contaminants with high conductivity, or cement type dust with hig density, and with frequent wetting by fog or drizzle • desert areas with fast accumulation of sand and salt, and regular condensation

[a] During a storm, the ESDD level at such a distance from the sea may reach a much higher level.
[b] The presence of a major city will have an influence over a longer distance, i.e. the distance specified for sea, desert and dry land.
[c] Depending on the topography of the coastal area and the wind intensity.

Una vez se selecciona el ambiente, se relaciona con un nivel de contaminación de acuerdo con lo establecido en la Figura 4.

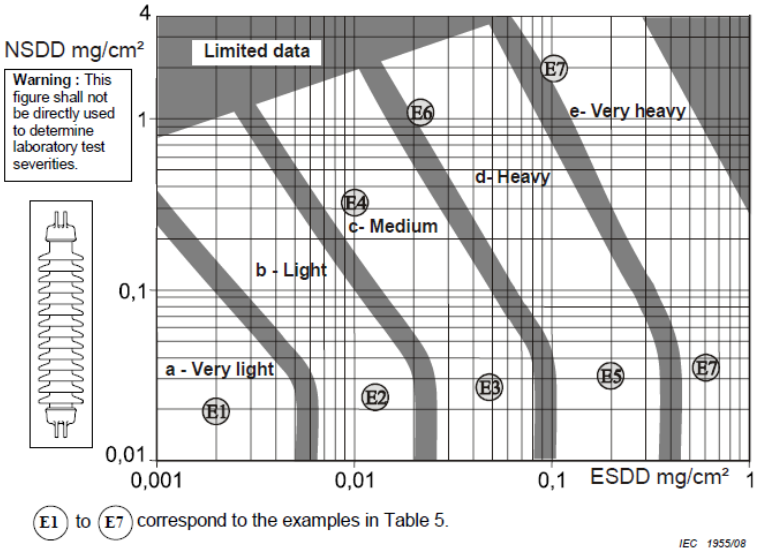


Figura 4.Selección de nivel de contaminación

Se puede establecer que la zona del proyecto se caracteriza por tener campos planos abiertos. Adicionalmente, no se encuentra expuesta a fuentes contaminantes, considerando que es una zona rural anexa a la cabecera municipal, que está compuesta especialmente por fincas ganaderas extensivas (pocos bovinos en grandes extensiones de terreno), por lo que se considera como un ambiente tipo E2, de acuerdo con la Tabla 9, que corresponde a un nivel de contaminación LIGERO, de acuerdo con la Figura 4. De acuerdo con la Figura 5, se establece el factor RUSCD (Reference unified specific creepage distances), que en este caso toma un valor de 27,8 mm/kV.

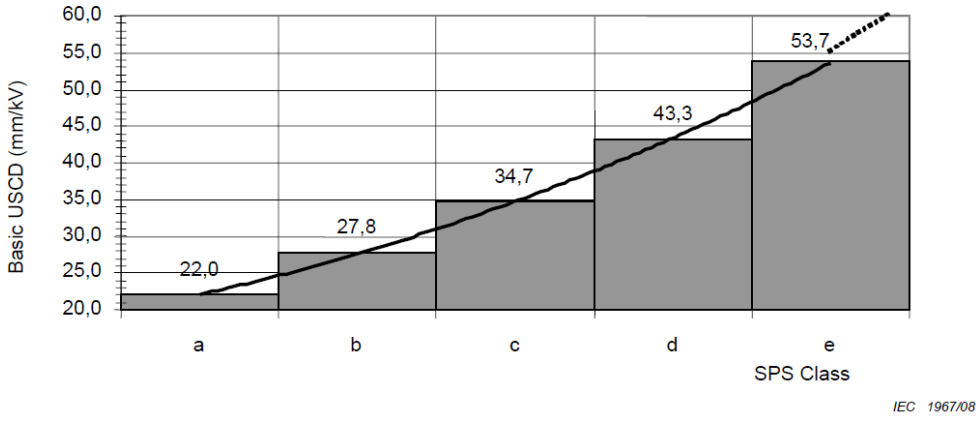


Figura 5. Selección de factor RUSCD [8]

9.1.4 FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA DISTANCIA DE FUGA

La distancia de fuga deberá ser corregida considerando la altitud, considerando la siguiente formulación, de acuerdo con lo establecido en el documento EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above [6]:

$$K_a = e^{m\left(\frac{H-1000}{8150}\right)}$$

Dónde:

m: Se define del siguiente modo.

- m = 1,0 para tensiones soportadas por impulsos de rayo de coordinación.
- m se calcula conforme a la Figura 9 de la norma IEC 60071-2 [9] para tensiones de tipo impulso por maniobra.

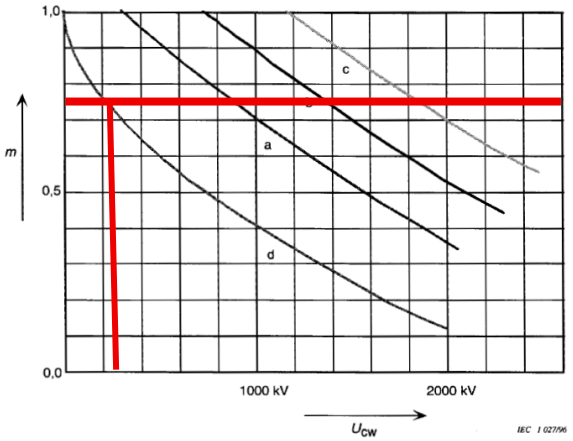


Figure 9 – Dependence of exponent *m* on the co-ordination switching impulse withstand voltage

Figura 6. Selección de factor m [9]

Aproximadamente 0,75.

- m = 1,0 para las tensiones tolerables de corta duración a frecuencia de alimentación de aislamiento en aire y aisladores limpios.

La m depende de diversos parámetros, como el recorrido mínimo de descarga, que no suele conocerse en la fase de especificación. Sin embargo, para efectos de la coordinación de aislamiento, las estimaciones conservadoras de m que se muestran en la Figura 9 de la norma IEC 60071-2 pueden utilizarse para la corrección de las tensiones de coordinación de aislamiento de impulso por maniobra. El exponente m de la ecuación presentada en el numeral 9.1.3 se determina de acuerdo con la norma IEC 60060 [10].

En la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 10. Factores de corrección de la distancia de fuga

Parámetro	Unidad	Valor
m	-	0,750
H	m	115
Ka	-	0,922

9.1.5 AISLAMIENTO A FRECUENCIA INDUSTRIAL

El aislamiento por sobretensiones a 60 Hz se deberá calcular de acuerdo con la siguiente formulación, basada en el EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above [7].

$$V_{60\,Hz} = \frac{V_{max\,L-L}}{\sqrt{3}} \times F_s \times F_\gamma \times F_\delta \times F_H$$

Dónde:

$V_{max\ L\text{-}L}$: Máximo voltaje de operación de la línea

F_S: Factor de sobrevoltaje por sobretensiones temporales, Su valor es de 1,4 para 230 kV

F_γ: Constante que tiene en cuenta los niveles de contaminación y el grado de mantenimiento de los aisladores, Su valor es 1,1.

δ: Densidad relativa del aire

F_δ: Factor por corrección de densidad del aire (δ), que depende de la altitud y la temperatura. Se calcula como el inverso de la densidad relativa del aire ($F_\delta = 1/\delta$).

F_H: Factor de corrección de rigidez dieléctrica del aislamiento por humedad. Se considera condición húmeda de manera que el factor es 1.

La distancia en aire se determina de la siguiente formulación tomada del numeral 3.3.4, del EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above [7], basado en la norma IEC 60071-1 [11].

$$CFO_{PF} = 750 \times Kg_{PF} \times \ln\left(1 + 0{,}55 \times {D_{pf}}^{1{,}2}\right)$$

Luego:

$$Kg_{PF} = 1{,}35K_g - 0{,}35K_g^2$$

Donde K_g es el factor de gap, el cual, para distancias en aire entre el conductor y la torre tiene un valor de 1,45.

De acuerdo con el EPRI [7], para el diseño se deberá considerar el tipo de contaminación existente para el proyecto, de acuerdo con la clasificación dada por la norma IEC 60815 [8] en el numeral 4.5, con gradiente de distancia de fuga mínima nominal en mm/kV.

La distancia en aire se determina de acuerdo con la referencia [7], con la formulación que se indica a continuación:

$$D_{pf} = 1{,}64 \times \left[e^{\left(\frac{CFO_{PF}}{750 \times K_{gPF}}\right)} - 1\right]^{0{,}833}$$

Donde CFO_{PF} corresponde a la sobretensión a 60 Hz ($V_{60\,Hz}$)

La distancia de fuga se calcula como sigue:

$$D_{fuga} = V_{max} \times d_{fuga} \times F_\gamma \times k_a{}^*$$

* Para el cálculo de la distancia de fuga se debe tener en cuenta el factor k_a solo si se tienen alturas superiores a los 1000 msnm.

En donde

V_{max}: Corresponde al máximo voltaje de operación Línea – neutro del sistema (kV)

d_{fuga}: Corresponde al gradiente de fuga, 27,8 mm/kV.

F_γ: Constante que tiene en cuenta los niveles de contaminación y el grado de mantenimiento de los aisladores, Su valor es 1.1.

k_a: Factor de corrección por altitud, dado a que la altura es menor a 1000msnm, se toma 1.

$$D_{fuga} = 141{,}451 \times 27{,}8 \times 1{,}1 \times 1$$

$$D_{fuga} = 4325{,}57$$

9.1.6 AISLAMIENTO FRENTE A SOBRETENSIONES DE MANIOBRA

Las sobretensiones por maniobra son tensiones que aparecen en determinados puntos debidos a operaciones de cierre o apertura de interruptores como:

- Energización de líneas
- Recierre de líneas
- Ocurrencia y eliminación de fallas
- Interrupción de corrientes capacitivas: desconexión de líneas o cables y reconexión de bancos de condensadores
- Interrupción de corrientes inductivas: corrientes de magnetización de transformadores e interrupción de reactores
- Operaciones de maniobra de circuitos especiales: condensadores en serie y circuitos resonantes y ferrorresonantes

El nivel de aislamiento se determina por el método determinístico, pero basado en resultados probabilísticos de líneas de transmisión, como los presentados en el EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above [7], IEEE Std 1313.2 [6] y el libro Overhead Power Lines [12]. Se considerará como parámetro de diseño un límite máximo de una falla por cada 100 operaciones de maniobra de la línea de acuerdo con lo indicado en el Código de Redes Resolución 025 de 1995 [2], (Anexo CC.1 Requisitos técnicos para la conexión de línea de transmisión al STN. Numeral 2.1).

Mediante la siguiente metodología se calculará la distancia en el aire fase - estructura requerida debido a sobretensiones de maniobra.

La máxima sobretensión esperada es:

$$\mathrm{U_{máx}} = \mathrm{F_v} * \mathrm{V_{máx}} * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Dónde:

$\mathrm{U_{máx}}$: Máxima sobretensión esperada (kVfase-tierra pico)

$\mathrm{F_v}$: Factor de sobrevoltaje, p.u.

Vale destacar que para rango I (nivel de tensión máxima del sistema menor a 245 kV) la norma de coordinación de aislamiento la IEC 60071 [11] indica que no son significativas las sobretensiones por maniobras, sin embargo, se toma como referencia el apéndice 9.4 del Libro Rojo del EPRI [7], en el cual, de acuerdo con la Figura A 9.4.5, para un porcentaje del 1% de riesgo para maniobras se tiene una sobretensión de 2,9 p.u fase-tierra.

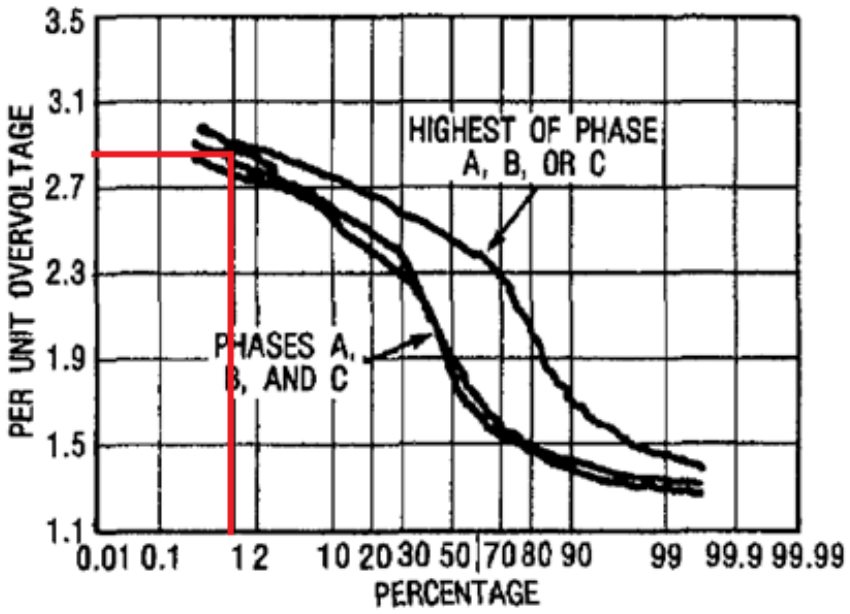


Figura 7. Distribución de sobrevoltajes fase-tierra EPRI.

$V_{máx}$: Tensión máxima de servicio del sistema (kVrms), 245 kV.

Para determinar la tensión que debe soportar el aislamiento se considera un factor de seguridad Fs=1,05 (apartado 2.5.1.2.2 del Libro Overhead Power Lines [12]) sobre la máxima sobretensión esperada, el cual se expresa como:

$$U_w = F_s * U_{máx}$$

Dónde:

U_w: Tensión de soporte (kVfase-tierra pico)

$U_{máx}$: Máxima sobretensión esperada (kV)

El CFO (Critical Flashover Overvoltage) del aislamiento de acuerdo con la IEEE Std 1313.2 [6], despejando de su ecuación 3, se puede determinar de la siguiente manera:

$$CFO = \frac{U_w}{\left(1 - k * \frac{\sigma_f}{CFO}\right)}$$

Dónde:

$\frac{\sigma_f}{CFO}$: Coeficiente de variación para esfuerzos tipo maniobra, el cual de acuerdo con la norma IEEE Std 1313.2 [6], debe ser del 5%.

k: Número de desviaciones estándar de acuerdo con la probabilidad de flameo que se considere del aislamiento el cual se asume 1,28 del nivel básico de aislamiento estadístico tipo maniobra (BSLS).

El CFO debe ser corregido de acuerdo con las condiciones del sitio, así finalmente la expresión del CFOc, con base a la IEEE 1313.2 [6] en su ecuación 14 es:

$$CFOc = \frac{U_w}{\left(1 - k * \frac{\sigma_f}{CFO}\right)} * k_{a_{sf}} = CFO * k_{a_sf}$$

Dónde:

k_{a_sf}: Factor de corrección por condiciones atmosféricas para maniobra entre fase y estructura, con base a la IEEE 1313.2 [6] en su ecuación 14, se obtiene mediante la metodología descrita en el numeral 9.1.2.

Así, la distancia en el aire fase- estructura para sobretensiones de maniobra está dada por:

$$D_{sf} = \frac{8}{\left(\frac{3400 * k_g}{CFOc} - 1\right)}$$

Dónde:

D_{sf}: Distancia en el aire para sobretensiones de maniobra (m).

k_g: Factor de gap, se toma 1.45, conforme al apartado 2.5.1.2, la tabla 2.14 del libro Overhead Power Lines [12].

Table 2.14: Gap factors for clearances in air

Type of gap	Slow-front overvoltage $K_{g_sf} = K_g$	Fast-front overvoltage K_{g_ff}	Power frequency voltage K_{g_pf}
Rod-to-plane	1,00	1,00	1,00
Conductor-to-obstacle	1,30	1,08	1,16
Conductor-to-plane	1,15	1,04	1,09
Conductor-to-tower window	1,25	1,07	1,14
Conductor-to-tower	1,45	1,12	1,22
Conductor-to-guys	1,40	1,10	1,2
Conductor-to-conductor	1,60	1,16	1,26

Note: The gap factors for fast-front and power frequency voltages are derived from the factors for slow-front overvoltages.

Figura 8. Factor Gap para distancias en aire

9.1.7 AISLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Las sobretensiones por descargas atmosféricas son tensiones fase a tierra o fase a fase debidos a una descarga atmosférica específica. Generalmente son unidireccionales y con duración entre 1 y 100 µs. Las descargas atmosféricas actúan sobre los sistemas de potencia y las líneas de transmisión a través de tres mecanismos: descargas directas a los conductores (fallas de apantallamiento) y descargas directas a las torres o a los cables de guarda (flameos inversos).

Adicionalmente, en caso de ser necesario, se pueden utilizar pararrayos en fases para asegurar la disponibilidad de la línea ante sobretensiones debido a descargas atmosféricas.

El objetivo del análisis del comportamiento de la línea ante sobretensiones atmosféricas es el de determinar la longitud mínima de la cadena de aisladores, con el fin de cumplir con el número de salidas máximo de 3 salidas/100 km-año [2]. En caso de que el número de salidas establecido como criterio de 3 salidas/100 km-año no se cumpla, se procederá a alargar las cadenas de aisladores.

El dimensionamiento de la cadena se realiza mediante la utilización del Applet "L-1 Transmission Line Lightning Performance", el cual se fundamenta en el método de los dos (2) puntos, desarrollado por EPRI [7] . Este programa permite determinar la sensibilidad de los diferentes parámetros de diseño como es el ángulo de apantallamiento, la resistencia de puesta a tierra de las estructuras, la longitud de la cadena de aisladores, etc.

Para garantizar un comportamiento apropiado de la línea ante las descargas atmosféricas, se debe definir una adecuada localización geométrica del cable de guarda, cuyo objetivo es apantallar la línea y una resistencia de puesta a tierra conveniente, cuyo fin es minimizar los efectos de los flameos inversos.

El número de descargas que inciden en la línea (descargas sobre los conductores, descargas sobre las torres o descargas sobre el cable de guarda), depende de la mayor o menor área de exposición de la línea, la cual, a su vez, está determinada por la altura y forma de la estructura, la disposición de los conductores y del cable de guarda, las características del corredor y la magnitud de la corriente de descarga. El valor medio del número de descargas a la línea (N), puede ser estimado de acuerdo con la siguiente ecuación de Ericsson:

$$N = N_g \frac{28h^{0,6} + b}{10}$$

Dónde:

h: Altura de la torre respecto al suelo, en (m)

b: Distancia de separación entre los cables de guarda, en (m) (0 para un solo cable de guarda)

N_g:Número de rayos por km^2 por año

N: Número de descargas por 100 km por año

Para definir el apantallamiento de la línea se utiliza el modelo electrogeométrico clásico de Whitehead. En la Figura 9 se muestra la posición del cable de guarda (S), del conductor (P) y del terreno.

En la Figura 9, a medida que un líder se aproxima a la línea, cada conductor emite un líder ascendente con una distancia de impacto Rs para el cable de guarda y una distancia Rp para la fase. Si el líder descendente penetra la zona A, ocurre un impacto en el cable de guarda; si el líder penetra la zona B, ocurre una falla del apantallamiento; si el líder penetra la zona C, hay una descarga a tierra. Las distancias Rs y Rp son determinadas por la corriente del primer impacto del rayo.

Las ecuaciones de las distancias de impacto son función de la corriente de impacto y de la altura del conductor. En este caso se usan las fórmulas sugeridas en la norma IEEE 1243-1997 [13], que toma como base el método de los Dos Puntos [7].

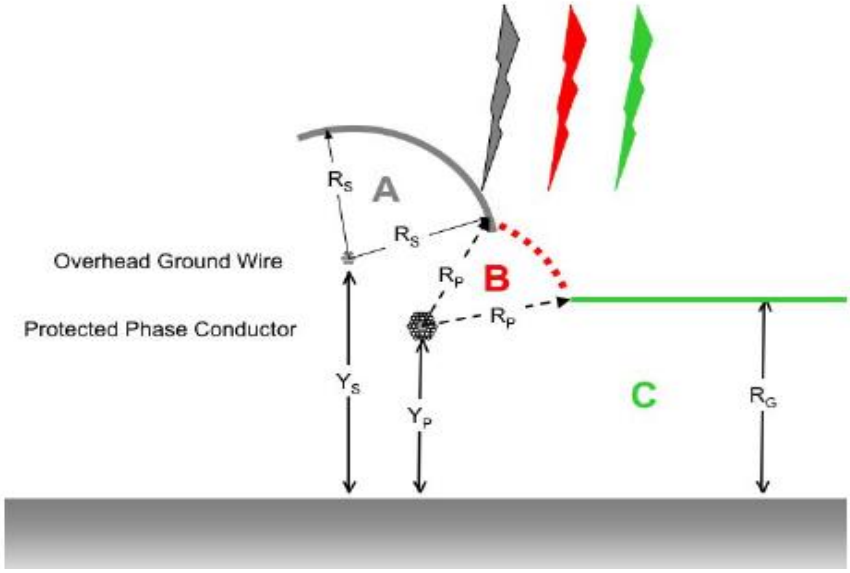


Figura 9. Modelo electrogeométrico IEEE 1243

Las ecuaciones más representativas del modelo son:

$$R_s = Rp = 10.0\, I^{0,65}$$

$$R_g = [3,6 + 1,7\mathrm{In}(43 - y_c)]I^{0,65} \quad yc < 40m$$

$$R_g = 5,5I^{0,65} \quad yc \geq 40m$$

Dónde:

I: Corriente pico de impacto, en [kA]

yc: Altura media de cualquier conductor, en [m]

Rs: Distancia de impacto al cable de guarda, en [m]

Rp: Distancia de impacto al conductor de fase, en [m]

Rg: Distancia de impacto a tierra, en [m]

Con el modelo electrogeométrico se determina el área expuesta de cada conductor ante descargas con una magnitud de corriente dada. Por esto, para establecer el número de salidas por fallas de apantallamiento, es necesario calcular un área expuesta promedio que considere la distribución probabilística de la magnitud de la corriente y la aleatoriedad en la rigidez del aislamiento, para luego multiplicarla por la densidad de rayos a tierra y obtener así el número de salidas de la línea por esta causa.

El cálculo de las fallas por apantallamiento y por flameo inverso, se realizará mediante el aplicativo L1 del libro rojo del EPRI [7] el cual emplea el método de los dos puntos.

La distancia entre fases se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación, tomada de la NESC, Sección 235B1b:

$$S_H = \left(0{,}0076V + 0{,}3681\sqrt{f}\right)$$

Dónde:

S_H: Espaciamiento horizontal entre fases (m)

V: Voltaje máximo de operación entre fases

f: Flecha del conductor a mitad de vano a la temperatura promedio con creep (m)

H: Altura sobre el nivel del mar

El segundo término de la ecuación para el cálculo de espaciamiento horizontal entre fases no se tendrá en cuenta puesto que únicamente aplica para alturas sobre el nivel del mar iguales o mayores a 1000 m.

Para determinar el nivel de aislamiento ante descargas atmosféricas, es necesario encontrar la soportabilidad eléctrica del aislamiento frente a una onda tipo rayo bajo condiciones atmosféricas, el cual se conoce como nivel básico de aislamiento al impulso (BIL). El BIL que se determinará será el estadístico ($\mathrm{BIL_s}$).

De acuerdo con la norma IEEE Std 1313.2 [6] el BIL estadístico de un aislamiento corresponde a la tensión, en términos del valor cresta y de frente rápido que es capaz de soportar sin romperse el 90% de las veces que es aplicada.

Por otro lado, se define el "Critical Flashover voltaje" (CFO) como la tensión, en términos del valor cresta y de frente rápido para la cual el aislamiento se rompe el 50% de las veces que es aplicada.

De acuerdo con la norma IEEE Std 1313.2 [6] y de la referencia [14], en su apartado 6.3.1.1 shielding failures, "CFO is the negative polarity lightning impulse, CFO is approximately 605 kV/m of strike distance or insulator lenght", se parte de que el valor de gradiente de CFO es de 605 kV/m para polaridad negativa y teniendo presente que la desviación estándar de la rigidez del aire para este tipo de sobretensiones es 3% del CFO de acuerdo con la IEEE Std 1313.2 [6], se calcula el valor del BILS ($1{,}28\,\sigma$).

Lo anterior se sintetiza en las siguientes expresiones:

$$\mathrm{BIL_s} = \mathrm{CFO} - 1{,}28\sigma_\mathrm{f} = \mathrm{CFO}\left(1 - 1{,}28\frac{\sigma_\mathrm{f}}{\mathrm{CFO}}\right)$$

Asumiendo que la distribución probabilística de ruptura sigue una distribución normal, se tendrá que:

$$\mathrm{BIL_s} = \mathrm{CFO} * 0{,}9616$$

Dónde:

σ_f: Desviación estándar (p.u)

Se considera una razón típica $\frac{\sigma_\mathrm{f}}{\mathrm{CFO}} = 0{,}03$ de acuerdo con la norma IEEE Std 1313.2-1999 [6].

Para calcular la distancia en aire fase – estructura que corresponde a la mínima que debe usarse para la distancia de arco de los aisladores, se utilizará la ecuación (2.51) y para la distancia fase – fase, se utilizará la ecuación (2.52), de la referencia [12]:

$$D_{ff_el} = \frac{U_{st}}{530 * k_{a_ff} * k_{z_ff} * k_{g_ff_el}} \quad (2.51)$$

$$D_{ff_pp} = \frac{1{,}2 * U_{st}}{530 * k_{a_ff} * k_{z_ff} * k_{g_ff_pp}} \quad (2.52)$$

Dónde:

Dff_el: Distancia en aire fase- estructura para sobretensiones de descargas atmosféricas (m).

Dff_pp: Distancia en aire fase – fase para sobretensiones de descargas atmosféricas (m).

Ust: Nivel básico de aislamiento estadístico a sobretensión tipo impulso (kV), se toma 90% BILs (1099,542 kV), se toma recomendación del libro libro Overhead Power Lines [12], en su apartado 2.5.2.2 "For determining phase-to-ground clearance distance, a voltage equal to 90% of the lightning withstand voltage $U_{90\%ff_ins}$of the insulator set should be taken into account. This voltage depends on the flashover distance $d_{ins}$of the insulator sets and on the type of air gap.

For phase-to-phase clearances, the representative overvoltage $1{,}20\ U_{90\%ff_ins}$ should be considered".

Ka_ff: Factor de corrección atmosférico para descargas atmosféricas, se toma 0,987.

Kz_ff: Factor de desviación para descarga atmosférica, se toma 0,961.

Kg_ff_el: Factor de gap para descarga atmosférica para fase-estructura, se toma 1,12 externa/ 1,07 interna.

Kg_ff_el: Factor de gap para descarga atmosférica para fase-fase, se toma 1,16.

A partir de la distancia obtenida presentada en la Tabla 14, considerada como la mínima posible, se realizará la evaluación del desempeño de la línea para cada tipo de torre, con el fin de garantizar el criterio de diseño de salidas por descargas atmosféricas (3 salidas/100 km-año).

9.1.8 DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA

La densidad de descargas a tierra se toma del resultado obtenido mediante el aplicativo EPRI, G-2 que dio como resultado una Densidad de Descargas a Tierra (DDT) de 13 Rayos /km² -año, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 4.

10 RESULTADOS SELECCIÓN DE AISLAMIENTO

10.1 CÁLCULO DE FACTORES METEOROLÓGICOS DE CORRECCIÓN DE AISLAMIENTO

Los factores meteorológicos de corrección de aislamiento, no se presentan en la versión E de este documento, dado a que no se requieren para la metodología presentada en la misma.

10.2 CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCIÓN EFECTO DE LA ALTITUD

En la Tabla 11, se muestran los resultados obtenidos con la metodología indicada en el numeral 9.1.2.

Tabla 11. Factores de corrección efecto de la altitud

Parámetro	Unidad	Valor
A	km	0,115
δ	kg/m^3	0,987
S	m	1,75
G_0	-	0,75
m	-	0,506
k_{a_sf}	-	0,993

Donde:

A: Altura sobre el nivel del mar en kilómetros

δ: Es la densidad relativa del aire calculada de forma probabilística a partir de la ecuación $\delta=e^{-A/8,59}$, estimada a partir de las cotas del perfil de cada tramo de línea

S: Distancia de aislamiento en aire (m)

G_0: Parámetro calculado a partir de Vs ≈ CFO y S

m: Constante que depende de la configuración de los electrodos, del tipo y la polaridad del impulso.

10.3 CÁLCULO DE AISLAMIENTO A FRECUENCIA INDUSTRIAL

Para el cálculo del aislamiento a frecuencia industrial, se toma el nivel de contaminación seleccionado en el numeral 9.1.3 y se aplica la metodología indicada en el numeral 9.1.5, a continuación, en la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 12. Cálculo de aislamiento a frecuencia industrial

Parámetro	Unidad	Valor
Vmax kV	kV	141,45
Fs	-	1,4
Fy	-	1,1
δ		0,987
Fδ	-	1,013
Fh	-	1
V 60Hz	kV	220,77
Kg	-	1,45
KgPF	-	1,222
CFOPF	-	220,77
DPF	m	0,56
Gradiente d fuga	mm/kV	27,800
Dfuga	mm	4325,566

10.4 CÁLCULO DEL AISLAMIENTO FRENTE A SOBRETENSIONES DE MANIOBRA

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología indicada en el numeral 9.1.6.

Tabla 13. Cálculo de aislamiento para sobretensiones de maniobra

Parámetro	Unidad	Valor
$V_{máx}$	kV	245
Elevación	msnm	115
$U_{máx}$	kV	580,12
F_v	-	2,9
U_w	kV	609,13
CFO	kV	650,78
K_{a_sf}	-	0,993
K_g	-	1,45
$CFO_{corregido}$	kV	646,39
D	m	1,21

Donde:

$V_{máx}$: Tensión máxima de servicio del sistema.

$U_{máx:}$ Máxima sobretensión esperada (kVfase-tierra pico)

F_v: Factor de sobrevoltaje, p.u.

U_w: Tensión de soporte (kV fase-tierra pico)

CFO: Critical Flashover Overvoltage, voltaje crítico al cual el aislamiento falla con probabilidad del 50%.

k_{a_sf}: Factor de corrección por condiciones atmosféricas para maniobra entre fase y estructura.

k_g: Factor de gap.

CFOc: CFO corregido a la altura de mar especifica del proyecto, ecuación dada en el numeral 9.1.2.

D: Distancia en aire Fase-Tierra.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la distancia en aire fase - tierra para sobretensiones de maniobra es de 1,21 m.

10.5 CÁLCULO AISLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para determinar la distancia de arco de los aisladores (distancia en aire para descargas atmosféricas fase – tierra) se realiza una sensibilidad con respecto al criterio de diseño de salidas por descargas atmosféricas (fallas por apantallamiento y por flameo inverso) de máximo de 3 salidas/100 km-año.

Para esta sensibilidad se utiliza el valor de la resistencia de puesta a tierra establecida en diseños preliminares a partir de los valores de medida de resistividad aparente en cada uno de los sitios de estructuras establecidos para el proyecto. Adicionalmente, se utilizará el valor de DDT establecidos en el numeral 9.1.8 (13 Rayos /km² -año).

Inicialmente, se calcula la distancia mínima fase – estructura, como valor mínimo necesario para garantizar el aislamiento requerido ante descargas atmosféricas, comenzando con una distancia de arco seco de 2,1m, conforme a la distancia mínima para la tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo, según la tabla A1 de la IEC 60071-2 [9]. A partir de este valor se realiza la sensibilidad para llegar al criterio de diseño para salidas por descargas atmosféricas mencionado anteriormente.

De acuerdo con los factores calculados anteriormente para corrección de los niveles de aislamiento, a continuación, se indican los resultados para la distancia a calcular:

Tabla 14. Distancias en aire fase – tierra, fase-fase para sobretensiones por descargas atmosféricas

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tensión máxima del sistema (kV)	245	$K_{g_ff_el}$	1,12
Elevación (msnm)	115	K_{a_ff}	0,987
CFO (kV)	1270,50	$U_{90\%ff_ins_ff}$(kV)	1099,542
BIL_S (kV)*	1221,71	$D_{ff_elexterna}$ (m)	1,96
K_{z_ff}	0,961	$D_{ff_elinterna}$ (m)	2,045
$K_{g_ff_pp}$	1,16	D_{ff_pp} (m)	2,52

10.5.1 CÁLCULO DE DISTANCIA DE AIRE SECO PARA AISLADORES

Partiendo de los aisladores requeridos por distancia de fuga calculados en el numeral 10.3 de este informe y teniendo en cuenta la densidad de descargas a tierra definida para el proyecto (13 descargas/km^2/año), se realizó el cálculo de salidas de línea, considerando las siluetas que se indican en el archivo CAM-LT-ELM-IN-016 "Planos de siluetas de estructuras".

Este cálculo se realizó con base en la tabla de estructuras y los planos de siluetas de cada una de las torres del tendido de la línea. Para dicho cálculo se utilizó la aplicación del EPRI L-1 Transmission Line Lightning Performance [7]. En el aplicativo del EPRI L-1 Transmission Line Lightning Performance se tuvo en cuenta la ionización del terreno la cual se presenta cuando el campo eléctrico (kV/m) se encuentra por encima del gradiente de ionización, y la resistencia del suelo disminuye. Adicionalmente se propone robustecer el sistema de puesta a tierra, incluyendo contrapesos en algunas estructuras, permitiendo así poder drenar las corrientes tipo rayo que generaban salidas por flameo inverso en la línea, esto deberá ser validado cuando se tengan los valores reales de resistividad y del sistema de puesta a tierra.

Los resultados obtenidos se presentan en el apartado 13, Anexo 1 y el resumen de estos resultados se muestra en la Tabla 15, comenzando con un valor de 2100 mm para la longitud de arco seco de la cadena de aisladores, considerando una resistencia de puesta a tierra de 20Ω para el pórtico y para las estructuras de la TC a la T10 consignada en la Tabla 8, una resistividad de 100Ω*m conforme la "Memoria de diseño de puestas a tierra" [5].

Tabla 15. Número de salidas por 100 km-año para la línea a 230 kV

Estructura No	Vano promedio (m)	Fallas (salidas/100 km/año)		
		Fallas de apantallamiento	Fallas por Flameo inverso	Total
Pórtico Chinú 230	41,655	0	0	0,000
TC	95,536	0,1	0	0,003
T1	488,609	0,5	0	0,064
T2	213,05	1,2	0	0,067
T3	547,569	0,1	0	0,014
T4	450,748	0,1	0	0,012
T5	423,81	0	0	0,000
T6	395,115	0,1	0	0,010
T7	518,822	0,2	0	0,027

Estructura No	Vano promedio (m)	Fallas (salidas/100 km/año)		
		Fallas de apantallamiento	Fallas por Flameo inverso	Total
T8	448,914	0	0	0,000
T9	134,442	0	0	0,000
T10	57,806	0,1	0	0,002
		Promedio ponderado		0,199≈1

Con base en los resultados obtenidos resumidos en la tabla anterior y detallados en numeral 13, se concluye que, considerando una distancia de arco seco de 2100 mm, se cumple con el valor límite de 3 salidas/100 km-año debidas a sobretensiones por descargas atmosféricas.

De la tabla anterior se concluye que para el aislamiento que se utilizará en el proyecto, si bien las simulaciones no muestran fallas por flameo inverso y muy pocas por fallas de apantallamiento, se sugiere un promedio de salidas 1 salidas/100 km/año. El valor de promedio ponderado de fallas por descargas atmosféricas obtenido equivale a 0,038 salidas/año para la longitud total aproximada de la línea de 3,8 km.

10.5.2 ÁNGULOS DE BALANCEO

El dimensionamiento eléctrico de las estructuras está relacionado con el ángulo de balanceo de las cadenas de aisladores, con el fin de que no se superen las distancias de aislamiento contra sobretensiones por maniobra (viento reducido) y para frecuencia industrial (viento máximo). En la siguiente figura se ilustra la geometría y las distancias consideradas para el cálculo de los ángulos de balanceo.

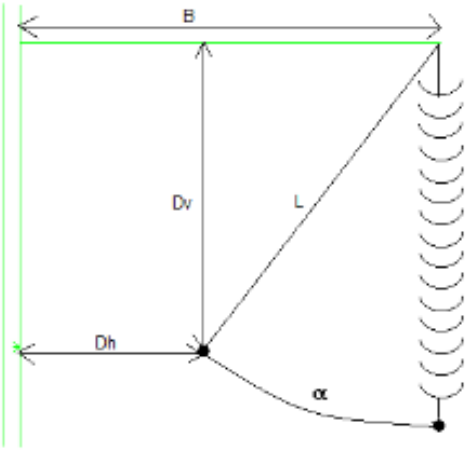


Figura 10. Geometría ángulos de balanceo

Dónde:

L: Longitud de la cadena,

Dh = Dv: Distancia de aislamiento en aire,

α: Ángulo de balanceo,

B: Brazo de la torre

De acuerdo con el esquema anterior los ángulos de balanceo se determinan de la siguiente manera:

Para la distancia vertical:

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{D_v}{L}\right)$$

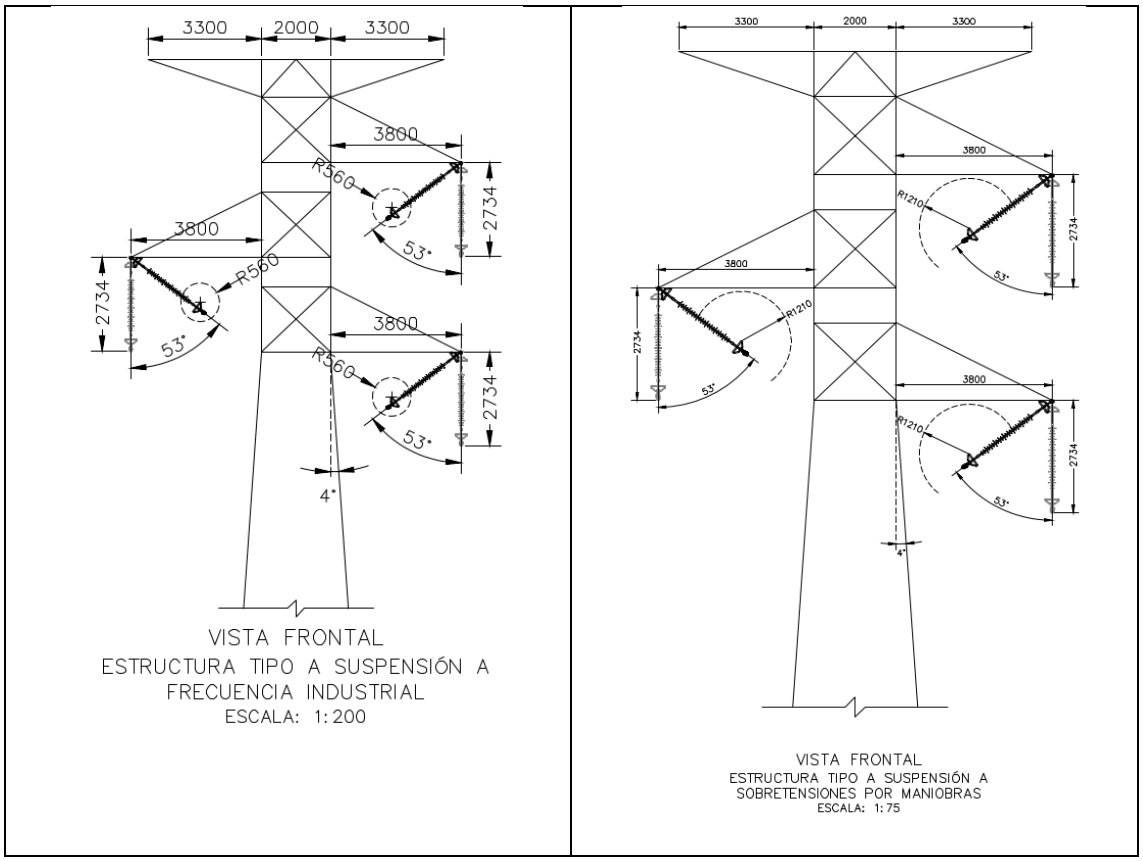
Para la distancia horizontal:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{(B - D_h)}{L}\right)$$

Ángulo de balanceo máximo: se asume simultáneamente viento máximo con periodo de retorno de 50 años (2% de probabilidad de ser excedido) y sobretensión a 60 Hz.

Ángulo de balanceo promedio: se asume simultáneamente viento máximo promedio y sobretensiones por maniobras.

Ángulo de balanceo mínimo: se asume simultáneamente sin viento y sobretensiones atmosféricas.



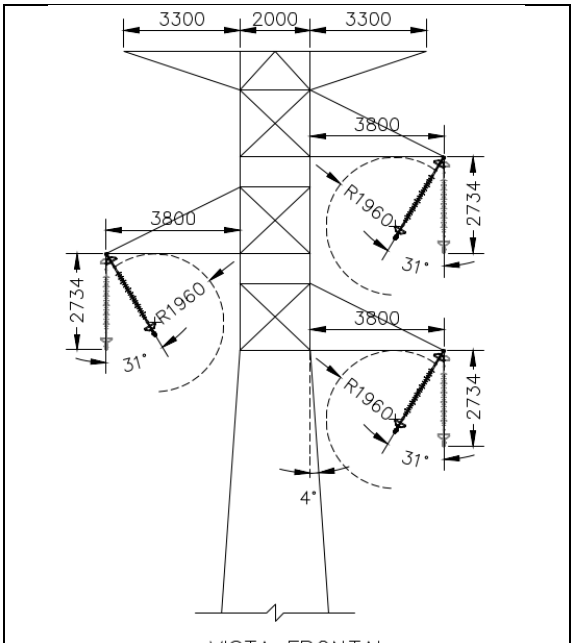


Figura 11. Ángulos de balanceo estructura tipo A

En la Tabla 16 se presentan los ángulos de balanceo típicos que se permitirán en las cadenas de aisladores de las estructuras de suspensión; además, en el plano CAM-LT-ELM-IN-016 "Planos de siluetas de estructuras" se pueden apreciar dichos ángulos.

Tabla 16. Ángulos de balanceo

Longitud máxima Cadena (m)	Distancia en Aire (m)			Ángulo de Balanceo (°)		
	Para ángulo máximo	Para ángulo promedio	Para ángulo mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
3	0,56	1,21	1,96	53	53	31

Verificación teórica

El dimensionamiento eléctrico de las estructuras está relacionado con el ángulo de balanceo de las cadenas de aisladores, con el fin de que no se superen las distancias de aislamiento contra sobretensiones por maniobra (viento reducido) y para frecuencia industrial (viento máximo). En la siguiente figura se ilustra la geometría y las distancias consideradas para el cálculo de los ángulos de balanceo.

Se consideran dos situaciones para los ángulos de balanceo, teniendo en cuenta diferentes posiciones de los conductores y distancias para garantizar la soportabilidad ante esfuerzos eléctricos:

- Caso 1: las distancias mínimas requeridas para resistir sobretensiones eléctricas a frecuencia industrial combinada con el ángulo de balanceo producido por el viento extremo. La probabilidad de producirse un flameo corresponde a la probabilidad de ocurrencia del viento extremo.

- Caso 2: las distancias mínimas requeridas para soportar sobretensiones debidas a descargas eléctricas combinadas con el ángulo de balanceo producido por el viento moderado. La probabilidad de producirse flameo corresponde a la probabilidad que se superen estas sobretensiones.

En la Tabla 17 se muestra la coordinación de la posición del conductor con los esfuerzos eléctricos a soportar por el espacio de aire:

Tabla 17. Coordinación de la posición con los esfuerzos eléctricos a soportar

Esfuerzos eléctricos en el aire	**Ángulo de balanceo producido por el viento moderado**	**Ángulo de balanceo producido por el viento extremo**
Tensión a frecuencia industrial	Menos restrictiva que caso 1	Caso 1
Sobretensión por descarga atmosférica	Caso 2	No se considera, poco probable

La separación mínima requerida entre el conductor y la estructura resultará de la comparación de los balanceos obtenidos para los casos 1 y 2 (ver Figura 12).

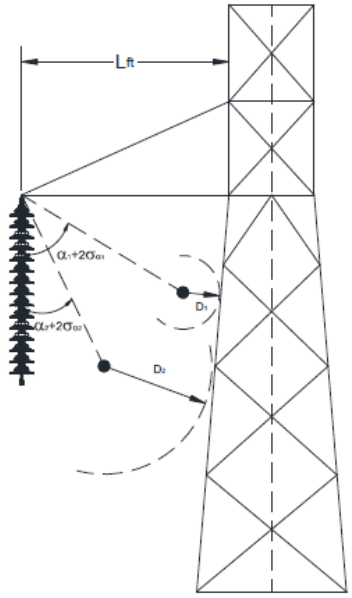


Figura 12. Ángulos de balanceo considerados para los casos 1 y 2 para espaciamiento entre conductor y apoyo

El ángulo medio de balanceo de la cadena de aisladores (φ_a) viene dado por:

$$\varphi_a = \tan^{-1}\left(\frac{T_{vc} + T_{va} + \frac{T_\emptyset}{2}}{P + \frac{P_a}{2} + P_c}\right)$$

Dónde:

T_{vc}: Carga debida al viento sobre los conductores (daN)

T_{va}: Carga transversal por viento sobre la cadena de aisladores (daN)

T_{ϕ}: Carga transversal debida al ángulo de deflexión de la línea (daN)

P: Carga vertical debida al peso del conductor, en su punto de sujeción (daN)

P_a: Carga vertical debida al peso de la cadena de aisladores y sus herrajes (daN)

P_c: Carga vertical debida al peso de los contrapesos instalados (si aplica) (daN)

La posición de los conductores está determinada por su ángulo medio de balanceo φ_c, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$\varphi_c = \tan^{-1}\left(\frac{T_{vc}}{P}\right)$$

Para establecer la separación mínima requerida entre conductores de fase, contenidos en un mismo plano horizontal, medida en la mitad del vano, se asumirá que uno de ellos está en la posición dada por el ángulo de balanceo menos dos desviaciones estándar, mientras que el otro estaría en una posición dada por el ángulo de balanceo más dos desviaciones estándar (ver Figura 13), lo anterior se debe a la dirección de incidencia del viento ya que se asume que sólo los vientos que actúan en la dirección de la cruceta causan un ángulo de balanceo máximo.

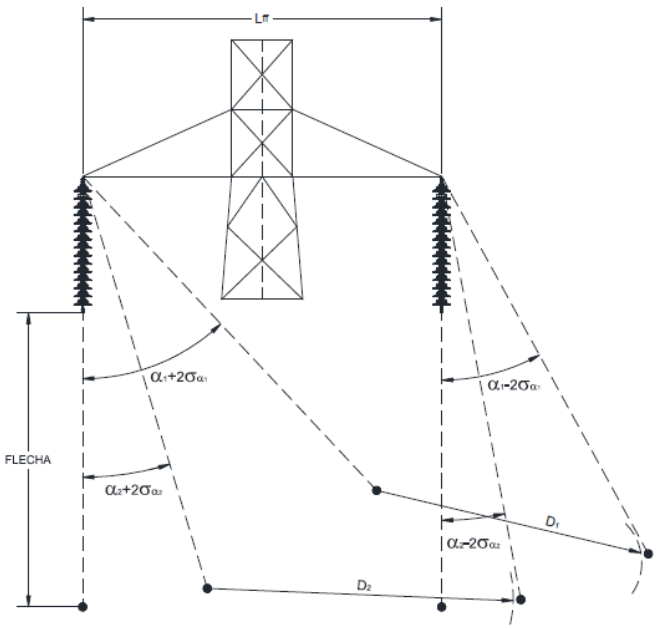


Figura 13. Ángulos de balanceo considerados para los casos 1 y 2 para espaciamiento entre conductores de fase a mitad de vano

De acuerdo con la Figura 13 y con el objeto de considerar los efectos de la longitud del vano en los ángulos de balanceo, se asume que estos siguen una distribución estadística tipo normal, con desviación estándar estimada mediante la siguiente expresión tomada del CIGRE TB348:2008):

$$\sigma_{\varphi} = 2{,}25\left[1 - e^{-\frac{V_R{}^2}{5608}}\right]$$

Dónde:

σ_{φ}: Desviación estándar del ángulo de balanceo (°)

V_R: Velocidad de viento de referencia, extremo o moderado según el caso (km/h), 80 y 48 kh/h respectivamente.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos mediante esta metodología.

Mediante el programa PLS-CADD, se obtienen las diferentes cargas para cada caso de carga, de estos se toman los valores que generan la mayor relación entre las cargas transversales y verticales, tomando así la condición más conservadora para cada uno de los casos, la cual limitara la dinámica del sistema.

Tabla 18. Valores máximos para cada caso de carga.

Caso de carga	Viento Máximo	Viento Promedio	Sin Viento	Pa [daN]	Pc [daN]
	Caso 1 Normal [daN]	Caso 2 Normal [daN]	EDS [daN]		
F. VIENTO (CARGA TRANSVERSAL)	436	157	1	19,62	NA
P. PROPIO (CARGA VERTICAL)	273	302	333		
F RESULTANTE (CARGA LONGITUDINAL)	2	0	0		

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para los ángulos de balanceo fase-tierra en la Tabla 20 y el cálculo para espaciamiento entre conductores de fase a mitad de vano en la Tabla 21.

Tabla 19. Cálculo ángulos de balanceo fase – tierra, fase-fase

Estructura/caso	Tv=Tvc+Tva [daN]	T_Φ	P [daN]	P_a [daN]	Desviación Estándar σ_o (°)	
					Caso 1	Caso 2
Suspensión fase - tierra	436	1	273	19,62	1,53	0,76
Suspensión fase - fase	157		302			

Tabla 20. Ángulos de balanceo fase - tierra

Estructura	Angulo total $\alpha_o+2*\sigma_o$ (°)		Angulo medio de balanceo φ_c
	Caso 1	Caso 2	
Suspensión	60,12	28,32	57,95

Tabla 21. Ángulos de balanceo fase – fase

Estructura	$\varphi_{\varphi 1}$ (°)	$\varphi_{\varphi 2}$ (°)	Angulo total $\varphi_\varphi+2*\sigma_o$ (°)		Angulo total $\varphi_\varphi-2*\sigma_o$ (°)	
			Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
Suspensión	57,06	26,799	4,59	2,27	-112,59	-52,84

Dado a que los ángulos calculados teóricamente son mayores a los calculados gráficamente, se toman como conservadores los calculados de manera gráfica, los cuales denotan los ángulos físicamente posibles.

Cabe aclarar que, en la verificación realizada gráficamente, se tienen en cuenta factores geométricos que limitan el movimiento de las cadenas, en este caso puntal, la limitación física se da con los anillos corona y herrajes utilizados en la cadena, consideraciones que no se toman en la verificación teórica, por lo que la verificación grafica es la opción físicamente más realista, a continuación, en la Figura 10 se muestra la restricción física de las mismas.

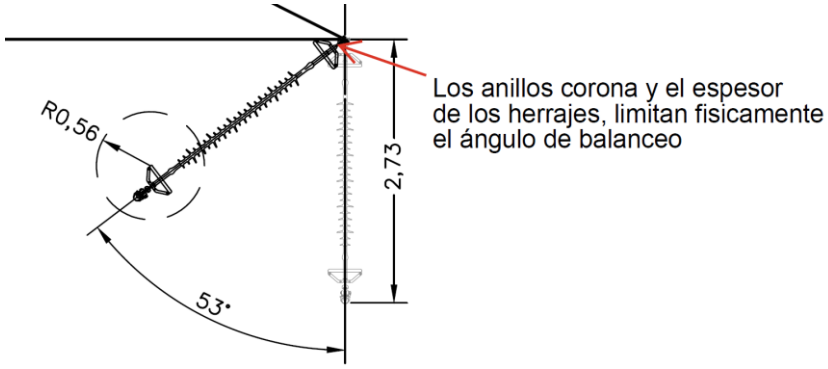


Figura 14.Restricción física de los herrajes y aisladores, para los balanceos.

Nota: Las restricciones de los ángulos de balanceo máximos definidos se aplicarán directamente sobre el modelo desarrollado en PLS-CADD, garantizando así el cumplimiento de las distancias de seguridad durante la etapa de diseño y plantillado.

10.5.3 MÁXIMO ÁNGULO DE DEFLEXIÓN

El máximo ángulo de deflexión que se permite en las torres dispuestas para cambios de dirección sin que se violen las distancias en aire fase - estructura, se calcula mediante una metodología similar a la expresada en el numeral 10.5.2 para el cálculo del ángulo de balanceo de las cadenas de suspensión, con la diferencia que el ángulo de deflexión es una condición permanente, por lo tanto para torres de retención dispuestas en la bisectriz del ángulo, se debe cumplir con la máxima distancia en aire para el ángulo medio de cambio de dirección en la estructura.

Además de la longitud de la cadena de aisladores, debido a que en el proyecto serán instalados anillos corona de ambos lados, será necesario tener en cuenta para la determinación de estos ángulos el área adicional considerada como energizada. Los resultados de los ángulos de deflexión obtenidos se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Ángulos de deflexión y longitud de alargadera para cadena de retención

Condición de cadena	Longitud de alargadera (mm)	Ángulo de cambio de dirección en la Torre (°)
Estructura tipo B		
Sin alargadera	-	32
Con alargadera	250	52
Con alargadera	500	62
Estructura tipo C		
Sin alargadera	-	32
Con alargadera	250	54
Con alargadera	500	62
Estructura tipo D		
Sin alargadera	-	32
Con alargadera	250	54

Con alargadera	500	64

Los resultados obtenidos se muestran en CAM-LT-ELM-IN-016 "Planos de siluetas de estructuras", adicional en el mismo plano se detallan los ángulos para los cuales comienza a ser necesarias las cadenas estabilizadoras, a continuación, se detallan los resultados.

Tabla 23. Máximo ángulo de deflexión sin cadena estabilizadora

Tipo de estructura	Máximo ángulo de deflexión sin cadena estabilizadora (°)
Tipo B	56
Tipo C	60
Tipo D	65

11 AISLADORES SUMINISTRADOS

A continuación, en la Figura 15 y en la Tabla 24, se presenta las características y disposición física de los aisladores poliméricos SHERMAN 24SM512681, suministrados por J.E Jaimes:

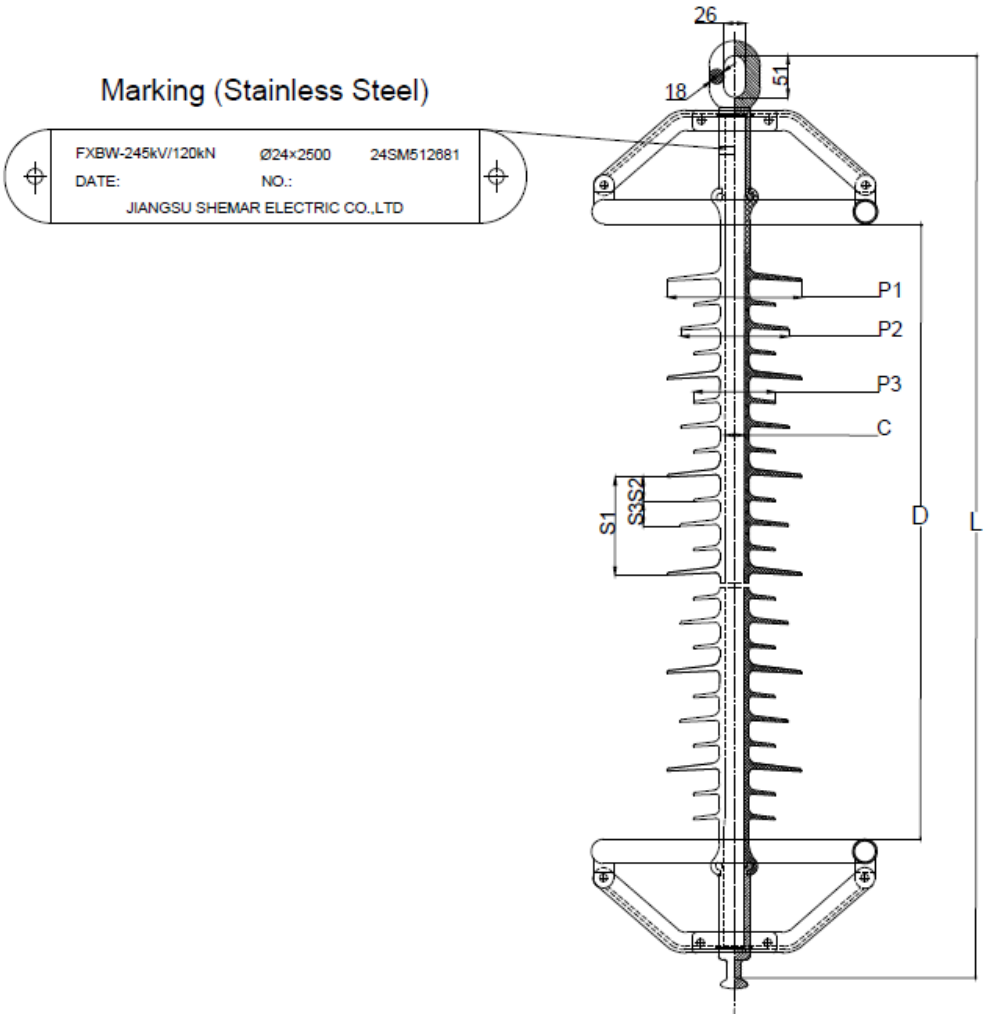


Figura 15. Aislador polimérico SHERMAN 24SM512681

Tabla 24. Características Aislador polimérico SHERMAN 24SM512681.

Descripción	Valor	Unidad
Dimensional Data		
Section Lenght (L)	2500+-30	mm
Dry Arc Distance (D)	>2100	mm
Shed Spacing (S1/S2/S3)	104/26/26	mm
Diameters of Shed (P1/P2/P3)	170/149/119	mm
Core Diameter ©	24	mm
Leakage Distance	>7596	mm
Tower End Corona Ring	Ø305x Ø 30	mm
Line End Corona Ring	Ø 305x Ø 30	mm
Minimum Sheathh Thickness	3	mm
Electrical Properties		
Rated voltage	245	kV
Wet Power Frequency Flashover Voltage	590	kV
Dry Power Frequency Flashover Voltage	625	kV
Dry Lightning Impulse Withstand Voltage	1430	kV
Mechanical Properties		
Specified Mechanical Load (SML)	120	kN
Routine Test Load (RTL)	60	kN
End Fittings		
Tower End Fitting	Eye	
Line End Fitting	Ball (IEC 60120 16)	
Minimum average galvanized layer thickness of End fittings	128 micro m	Micro m
Material		
Corona Ring	AL	
End Fittings	Glav. Steel	
Weathersheds	HTV Silicone Rubber	
Core	E-CR FRP	
Color of Sheds	Grey, same as RAL 7047	
Weight (aprox.)	15	kg

11.1 VALIDACIÓN DE LOS AISLADORES

A continuación, se presenta la validación de los aisladores suministrados, conforme los requerimientos presentados en el desarrollo de este documento.

Tabla 25. Verificación aislador propuesto J.E. Jaimes.

Descripción	Requerido Aislador para cadenas de suspensión y retención	Ofrecido Aislador SHERMAR 24SM512681
Referencia	---	24SM512681
Tipo	Compuesto	Compuesto

Descripción	Requerido Aislador para cadenas de suspensión y retención	Ofrecido Aislador SHERMAR 24SM512681
Material	Silicona	HTV Silicone Rubber
Configuración	Ojo - bola / otra configuración podrá considerarse de acuerdo con el suministro de aisladores	Ojo - Bola
Distancia mínima de arco seco (mm)	2100	>2100
Distancia mínima de fuga (mm)	4326	>7596
Sobretensión a frecuencia industrial (kV)	>220,77	Wet 590 / Dry 625
Sobretensión frente a descargas atmosféricas (kV)	>1221,71	1430
Tensión nominal (kV)	245	245

Con base a lo expuesto en la Tabla 25, se puede comprobar que el aislador cumple con los requisitos mínimos eléctricos para el proyecto.

12 CONCLUSIONES DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

- Las características mínimas determinadas para los aisladores que se utilizarán en el proyecto son las que se describen a continuación.

Tabla 26. Características del aislador polimérico – Cadena de suspensión y retención

Característica	Aislador para cadenas de suspensión y retención
Referencia	---
Tipo	Compuesto
Material	Silicona
Configuración	Ojo - bola / otra configuración podrá considerarse de acuerdo con el suministro de aisladores
Distancia mínima de arco seco (mm)	2100
Distancia mínima de fuga (mm)	4326
Tensión nominal (kV)	245 kV
Sobretensión a frecuencia industrial (kV)	>=220,77
Sobretensión frente a descargas atmosféricas (kV)	>=1221,71

- Las distancias mínimas de arco seco, distancia mínima de fuga y configuración de aisladores, serán utilizados para el pórtico de la subestación, tanto en el pórtico de llegada de línea, como en las barras de este.
- Teniendo en cuenta las máximas sobretensiones que se presentarían en el sistema a frecuencia industrial, por descargas atmosféricas y ante maniobras, en la siguiente Tabla se presentan las distancias de aislamiento en aire a respetar para garantizar el buen desempeño de la línea de transmisión.

Tabla 27. Distancias de aislamiento

Tipo de sobretensión	Distancias mínimas en aire fase-estructura (m)	Distancias mínimas en aire fase-fase (m)
Frecuencia industrial	0,56	-
Descargas atmosféricas	1,96	2,52
Maniobras	1,21	-

- En la Tabla 22 se presentan los ángulos de deflexión que se permitirán en las cadenas de retención.
- En la Tabla 28 se presenta el resumen de coordinación de aislamiento.

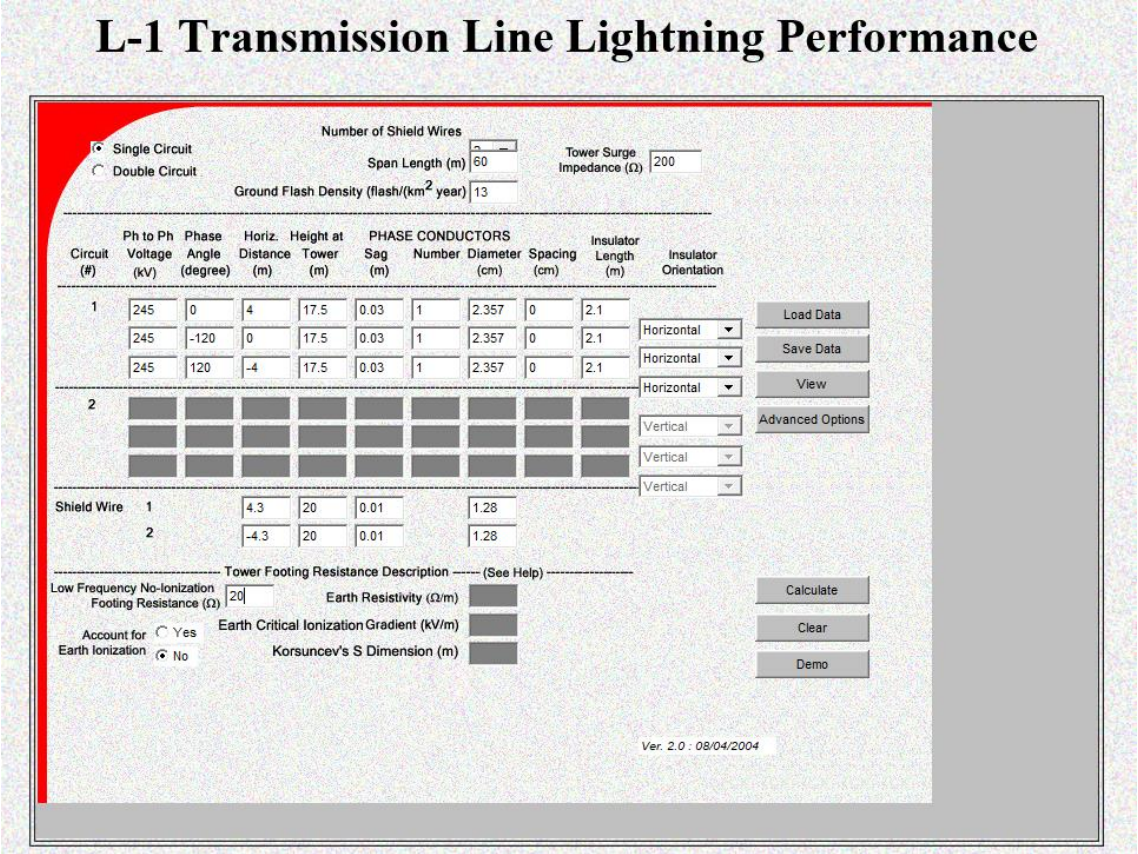
Tabla 28.Resumen de coordinación de aislamiento

Factores de corrección por efecto de la altitud	
Densidad relativa del aire (δ)	0,987
Distancia de aislamiento en aire en metros (S)	1,75
Factor G_0	0,75
Factor m	0,506
Factor de corrección por condiciones atmosféricas maniobra F-T ($k_{a\ sf}$)	0,993
Factores de corrección de la distancia de fuga	
Altura sobre el nivel del mar (H)	115
Factor de corrección por altitud (Ka)	0,922
Aislamiento a frecuencia industrial	
Sobretensiones de 60 Hz en kV (V 60Hz)	220,770
Distancia en aire fase-estructura (Dpf)	0,56
Distancia de fuga (Dfuga)	4326

Aislamiento frente a sobretensiones por maniobra	
Máxima sobretensión esperada(kVfase-tierra pico)	580,12
Tensión de soporte (kV fase-tierra pico)	609,13
Tensión critica de flameo (CFO)	650,78
Tensión critica de flameo corregida (CFOcorregida)	646,39
Distancia en aire fase-estructura (D)	1,21
Aislamiento frente a descargas atmosféricas	
Tensión critica de flameo (CFO)	1270,5
Nivel básico de aislamiento al impulso (BILs) (kV)	1221,71
Distancias mínimas en aire fase-estructura (m)	1,96
Distancias mínimas en aire fase-fase (m)	2,52
Densidad de descargas a tierra (DDT)	13

13 ANEXO 1 SIMULACIONES DE SALIDAS POR RAYO

Pórtico Chinú 230 kV




```
                    LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 60 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                        PHASE WIRE DESCRIPTION
    .      Ph-to-Ph    Phase    Horizontal    Height    .          --- SUBCONDUCTORS ---       ----Insulator-----
Circuit    Voltage     Angle     Distance     AtTower    Sag    Number    Diameter    Spacing    Length     Orientation
 (#)         (kV)     (degree)      (m)          (m)      (m)    .          (cm)        (cm)       (m)       (See note)
 ---         ---      ------      -----        -----    ----    ----      -----       -----      -----         ----
   1         245         0          4.0         17.5     0.0       1       2.36        0.0       2.10          2
   1         245      -120          0.0         17.5     0.0       1       2.36        0.0       2.10          2
   1         245       120         -4.0         17.5     0.0       1       2.36        0.0       2.10          2

      SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)     (m)    (m)    (cm)
  -----   -----  -----   -----
 4.3      20.0     0.0     1.28
 -4.3     20.0     0.0     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.0 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 189.2 per 100 km per year
       Total number of flashes to the line: 189.2 per 100 km per year

There are no shielding failures
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.0 per 100 km per year
                                Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                  Total number of flashovers: 0.0 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
    .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase     Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.0           0.0           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.0           0.0           0.0
```

TC

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2
Span Length (m): 96
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	5	32.5	0.14	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	-120	-5	29.75	0.14	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	120	5	27	0.14	1	2.357	0	2.1	Horizontal
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire 1			4.3	35.5	0.08		1.28			
2			-4.3	35.5	0.08		1.28			

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ------ (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 2.233
Earth Resistivity (Ω/m):
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):
Account for Earth Ionization: Yes / No

Calculate | Clear | Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 96 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
    .      Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .        --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit    Voltage    Angle    Distance    AtTower   Sag   Number   Diameter   Spacing   Length   Orientation
 (#)         (kV)    (degree)     (m)         (m)     (m)   .          (cm)       (cm)      (m)      (See note)
 ---         ----    ------     -----       -----    ----   ----     -----      -----     -----       ----
   1          245        0        5.0        32.5     0.1      1      2.36       0.0       2.10         2
   1          245     -120       -5.0        29.8     0.1      1      2.36       0.0       2.10         2
   1          245      120        5.0        27.0     0.1      1      2.36       0.0       2.10         2

      SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)      (m)    (m)    (cm)
  -----    -----  -----   -----
 4.3       35.5     0.1     1.28
 -4.3      35.5     0.1     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.1 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 231.7 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 231.8 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.1 per 100 km per year
                           Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.1 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
    .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase     Failures     Flashovers    Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.1           0.1           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.1           0.1           0.0
```

T1

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2
Span Length (m): 489
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	4.9	50.5	3.59	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	-120	-4.9	47.75	3.59	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	120	4.9	45	3.59	1	2.357	0	2.1	Horizontal
2										Vertical
										Vertical
										Vertical

Shield Wire	Horizontal Distance (m)	Height at Tower (m)	Sag (m)	Diameter (cm)
1	4.3	53.5	2.05	1.28
2	-4.3	53.5	2.05	1.28

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ------ (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 2.233
Earth Resistivity (Ω/m):
Account for Earth Ionization: ○ Yes ◉ No
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):

Calculate | Clear | Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 489 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
    .      Ph-to-Ph    Phase    Horizontal    Height    .          --- SUBCONDUCTORS ---       ----Insulator-----
Circuit    Voltage     Angle     Distance     AtTower    Sag    Number    Diameter    Spacing    Length    Orientation
 (#)         (kV)     (degree)      (m)          (m)      (m)    .           (cm)        (cm)       (m)       (See note)
 ---         ----     ------      -----        -----     ----    ----       -----       -----      -----        ----
   1         245          0         4.9         50.5      3.6       1        2.36         0.0       2.10          2
   1         245       -120        -4.9         47.8      3.6       1        2.36         0.0       2.10          2
   1         245        120         4.9         45.0      3.6       1        2.36         0.0       2.10          2

      SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
    (m)     (m)    (m)    (cm)
   -----   -----  -----   -----
  4.3      53.5     2.0     1.28
 -4.3      53.5     2.0     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.5 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 255.3 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 255.7 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.5 per 100 km per year
                           Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.5 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
   .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase    Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.4          0.4          0.0
   2         0.1          0.1          0.0
   3         0.0          0.0          0.0

Total        0.5          0.5          0.0
```

T2

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2
Span Length (m): 214
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	5	50.5	0.68	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	-120	-5	47.75	0.68	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	120	5	45	0.68	1	2.357	0	2.1	Horizontal
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire	1		4.3	53.5	0.39		1.28			
	2		-4.3	53.5	0.39		1.28			

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ----- (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 2.233
Earth Resistivity (Ω/m):
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):
Account for Earth Ionization: Yes / No

Calculate | Clear | Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 214 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
   .      Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .         --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit    Voltage   Angle    Distance    AtTower   Sag   Number   Diameter   Spacing   Length   Orientation
 (#)         (kV)   (degree)     (m)         (m)     (m)   .          (cm)       (cm)      (m)     (See note)
 ---         ---    ------     -----       -----    ----   ----      -----      -----     -----       ----
   1         245         0       5.0        50.5     0.7      1      2.36        0.0      2.10          2
   1         245      -120      -5.0        47.8     0.7      1      2.36        0.0      2.10          2
   1         245       120       5.0        45.0     0.7      1      2.36        0.0      2.10          2

       SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)      (m)    (m)    (cm)
  -----    -----  -----   -----
 4.3       53.5     0.4     1.28
 -4.3      53.5     0.4     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 1.2 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 256.0 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 257.2 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 1.2 per 100 km per year
                                Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 1.2 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
   .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase    Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.9           0.9           0.0
   2         0.4           0.3           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        1.2           1.2           0.0
```

T3

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2
Span Length (m): 548
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	4.8	43.266	4.51	1	2.357	0	2.1	Vertical
	245	-120	-4.8	40.516	4.51	1	2.357	0	2.1	Vertical
	245	120	4.8	37.766	4.51	1	2.357	0	2.1	Vertical
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire 1			4.3	49	2.58		1.28			
Shield Wire 2			-4.3	49	2.58		1.28			

Load Data
Save Data
View
Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ------ (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 3.084
Earth Resistivity (Ω/m):
Account for Earth Ionization: Yes / No
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):

Calculate
Clear
Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 548 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
    .      Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .          --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit    Voltage    Angle    Distance    AtTower   Sag   Number    Diameter   Spacing   Length    Orientation
 (#)         (kV)    (degree)     (m)         (m)     (m)   .           (cm)       (cm)      (m)      (See note)
 ---         ----    ------     -----       -----    ----   ----       -----      -----     -----       ----
   1         245        0        4.8         43.3     4.5     1        2.36       0.0       2.10         1
   1         245      -120      -4.8         40.5     4.5     1        2.36       0.0       2.10         1
   1         245       120       4.8         37.8     4.5     1        2.36       0.0       2.10         1

      SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
    (m)      (m)    (m)    (cm)
  -----    -----  -----   -----
 4.3       49.0     2.6     1.28
 -4.3      49.0     2.6     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.1 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 250.5 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 250.6 per 100 km per year

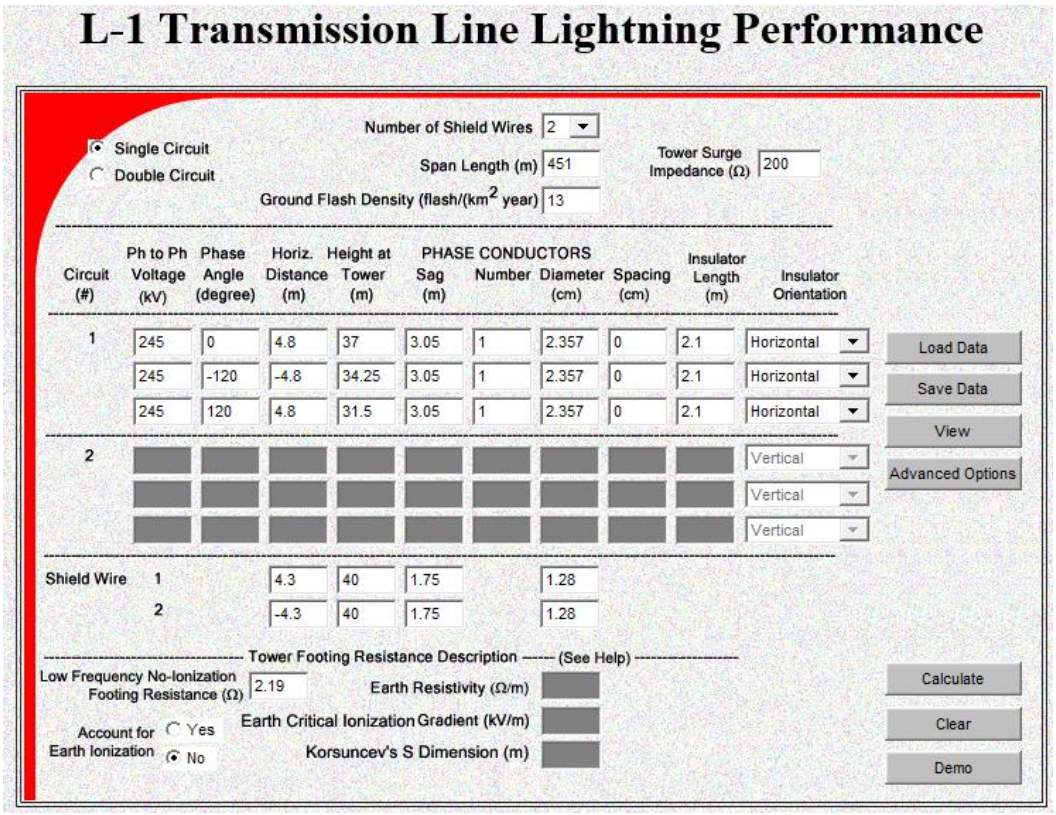
Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.1 per 100 km per year
                          Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.1 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
    .       Shielding    Shiel.Fail.
 Phase      Failures     Flashovers    Backflashovers
  (#)    (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1          0.1           0.0           0.0
   2          0.0           0.0           0.0
   3          0.0           0.0           0.0

Total         0.1           0.1           0.0
```

T4



```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 451 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
      (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
   .     Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .        --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit   Voltage   Angle    Distance    AtTower   Sag   Number   Diameter   Spacing   Length   Orientation
 (#)       (kV)    (degree)     (m)         (m)     (m)    .         (cm)       (cm)      (m)      (See note)
 ---       ----    ------     -----       -----    ----   ----      -----      -----     -----       ----
   1        245        0        4.8        37.0     3.0      1       2.36       0.0       2.10         2
   1        245     -120       -4.8        34.3     3.0      1       2.36       0.0       2.10         2
   1        245      120        4.8        31.5     3.0      1       2.36       0.0       2.10         2

      SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)      (m)    (m)     (cm)
  -----    -----  -----   -----
 4.3       40.0     1.8      1.28
 -4.3      40.0     1.8      1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.1 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 238.3 per 100 km per year
       Total number of flashes to the line: 238.4 per 100 km per year

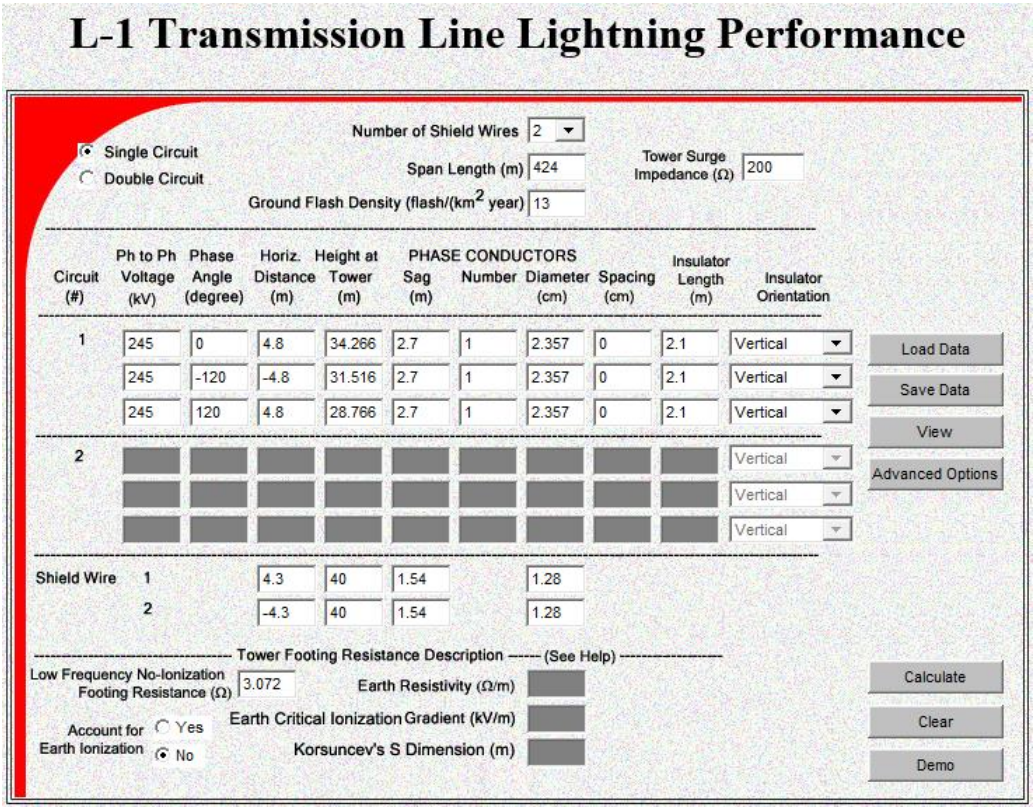
Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.1 per 100 km per year
                            Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.1 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
   .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase    Failures     Flashovers    Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.1           0.1           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.1           0.1           0.0
```

T5



LIGHTNING PERFORMANCE

Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 424 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
(h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

PHASE WIRE DESCRIPTION

Circuit (#)	Ph-to-Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horizontal Distance (m)	Height AtTower (m)	Sag (m)	--- SUBCONDUCTORS --- Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	----Insulator----- Length (m)	Orientation (See note)
1	245	0	4.8	34.3	2.7	1	2.36	0.0	2.10	1
1	245	-120	-4.8	31.5	2.7	1	2.36	0.0	2.10	1
1	245	120	4.8	28.8	2.7	1	2.36	0.0	2.10	1

SHIELD WIRE DESCRIPTION

Horizontal Distance (m)	Height AtTower (m)	Sag (m)	Diameter (cm)
4.3	40.0	1.5	1.28
-4.3	40.0	1.5	1.28

RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.0 per 100 km per year
Flashes to shield wire: 238.4 per 100 km per year
Total number of flashes to the line: 238.4 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

Flashovers caused by shielding failures: 0.0 per 100 km per year
Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
Total number of flashovers: 0.0 per 100 km per year

Breakdown by Phase

Phase (#)	Shielding Failures (1/100kmYear)	Shiel.Fail. Flashovers (1/100kmYear)	Backflashovers (1/100kmYear)
1	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0
Total	0.0	0.0	0.0

T6

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2
Span Length (m): 396
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	4.8	43.27	2.35	1	2.357	0	2.1	Vertical
	245	-120	-4.8	40.52	2.35	1	2.357	0	2.1	Vertical
	245	120	4.8	37.77	2.35	1	2.357	0	2.1	Vertical
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire 1			4.3	49	1.34		1.28			
2			-4.3	49	1.34		1.28			

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ------ (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 3.084
Earth Resistivity (Ω/m):
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):
Account for Earth Ionization: Yes / No

Calculate | Clear | Demo

```
                    LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 396 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                     PHASE WIRE DESCRIPTION
    .      Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .          --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit    Voltage    Angle    Distance    AtTower   Sag   Number    Diameter   Spacing   Length    Orientation
 (#)         (kV)    (degree)     (m)         (m)     (m)    .          (cm)       (cm)      (m)       (See note)
 ---         ----    ------     -----       -----    ----   ----       -----      -----     -----       ----
   1          245        0        4.8        43.3     2.4      1       2.36       0.0       2.10          1
   1          245     -120       -4.8        40.5     2.4      1       2.36       0.0       2.10          1
   1          245      120        4.8        37.8     2.4      1       2.36       0.0       2.10          1

       SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
    (m)     (m)    (m)     (cm)
   -----   -----  -----   -----
  4.3      49.0     1.3     1.28
 -4.3      49.0     1.3     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.1 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 250.9 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 250.9 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.1 per 100 km per year
                                Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                  Total number of flashovers: 0.1 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
    .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase     Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.1           0.0           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.1           0.1           0.0
```

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2
Span Length (m): 519
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	4.9	41.5	4.04	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	-120	-4.9	38.75	4.04	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	120	4.9	36	4.04	1	2.357	0	2.1	Horizontal
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire	1		4.3	44.5	2.31		1.28			
	2		-4.3	44.5	2.31		1.28			

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ------ (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 2.23
Earth Resistivity (Ω/m):
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):
Account for Earth Ionization: Yes / No

Calculate | Clear | Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 519 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
    .     Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .         --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit   Voltage    Angle    Distance    AtTower   Sag   Number   Diameter   Spacing   Length   Orientation
 (#)        (kV)    (degree)     (m)         (m)     (m)   .          (cm)       (cm)      (m)     (See note)
 ---        ----    ------     -----       -----    ----   ----      -----      -----     -----       ----
   1         245         0       4.9        41.5     4.0      1       2.36        0.0      2.10         2
   1         245      -120      -4.9        38.8     4.0      1       2.36        0.0      2.10         2
   1         245       120       4.9        36.0     4.0      1       2.36        0.0      2.10         2

       SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
    (m)     (m)    (m)    (cm)
  -----    -----  -----   -----
 4.3       44.5     2.3     1.28
 -4.3      44.5     2.3     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.2 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 244.4 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 244.6 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.2 per 100 km per year
                            Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.2 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
    .      Shielding     Shiel.Fail.
 Phase     Failures      Flashovers    Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear)  (1/100kmYear)  (1/100kmYear)
   1         0.1           0.1            0.0
   2         0.1           0.1            0.0
   3         0.0           0.0            0.0

Total        0.2           0.2            0.0
```

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Single Circuit / Double Circuit

Number of Shield Wires: 2

Span Length (m): 449

Tower Surge Impedance (Ω): 200

Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	4.8	34.266	3.03	1	2.357	0	2.1	Vertical
	245	-120	-4.8	31.516	3.03	1	2.357	0	2.1	Vertical
	245	120	4.8	28.77	3.03	1	2.357	0	2.1	Vertical
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire 1			4.3	40	1.73		1.28			
2			-4.3	40	1.73		1.28			

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ----- (See Help)

Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 3.084

Earth Resistivity (Ω/m)

Account for Earth Ionization: Yes / No

Earth Critical Ionization Gradient (kV/m)

Korsuncev's S Dimension (m)

Calculate | Clear | Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 449 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
   .     Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .         --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit   Voltage   Angle    Distance    AtTower   Sag   Number   Diameter   Spacing   Length   Orientation
 (#)        (kV)   (degree)     (m)         (m)     (m)   .          (cm)       (cm)      (m)     (See note)
 ---        ----   ------     -----       -----    ----   ----     -----      -----     -----       ----
   1         245        0       4.8        34.3     3.0      1      2.36        0.0      2.10          1
   1         245     -120      -4.8        31.5     3.0      1      2.36        0.0      2.10          1
   1         245      120       4.8        28.8     3.0      1      2.36        0.0      2.10          1

       SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)      (m)    (m)    (cm)
  -----    -----  -----  -----
 4.3       40.0    1.7     1.28
 -4.3      40.0    1.7     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.0 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 238.4 per 100 km per year
       Total number of flashes to the line: 238.4 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.0 per 100 km per year
                              Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.0 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
   .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase    Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.0           0.0           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.0           0.0           0.0
```

T9

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Number of Shield Wires: 2
Single Circuit / Double Circuit
Span Length (m): 135
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	4.8	32.5	0.27	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	-120	-4.8	29.75	0.27	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	120	4.8	27	0.27	1	2.357	0	2.1	Horizontal
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire 1			4.3	35.5	0.16		1.28			
2			-4.3	35.5	0.16		1.28			

Load Data | Save Data | View | Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ----- (See Help)
Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 2.19
Earth Resistivity (Ω/m)
Account for Earth Ionization: Yes / No
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m)
Korsuncev's S Dimension (m)

Calculate | Clear | Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 135 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
   .      Ph-to-Ph    Phase    Horizontal    Height    .         --- SUBCONDUCTORS ---       ----Insulator-----
Circuit    Voltage    Angle     Distance    AtTower    Sag    Number    Diameter    Spacing    Length    Orientation
 (#)         (kV)    (degree)      (m)         (m)      (m)     .          (cm)        (cm)       (m)      (See note)
 ---         ----    ------      -----       -----     ----    ----       -----       -----      -----       ----
   1          245         0        4.8        32.5      0.3       1       2.36         0.0       2.10          2
   1          245      -120       -4.8        29.8      0.3       1       2.36         0.0       2.10          2
   1          245       120        4.8        27.0      0.3       1       2.36         0.0       2.10          2

       SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)      (m)     (m)     (cm)
  -----    -----   -----    -----
 4.3       35.5      0.2      1.28
 -4.3      35.5      0.2      1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.0 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 231.5 per 100 km per year
       Total number of flashes to the line: 231.6 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.0 per 100 km per year
                               Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                 Total number of flashovers: 0.0 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
   .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase    Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.0           0.0           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.0           0.0           0.0
```

T10

L-1 Transmission Line Lightning Performance

Number of Shield Wires: 2
Single Circuit / Double Circuit
Span Length (m): 60
Tower Surge Impedance (Ω): 200
Ground Flash Density (flash/(km^2 year)): 13

Circuit (#)	Ph to Ph Voltage (kV)	Phase Angle (degree)	Horiz. Distance (m)	Height at Tower (m)	PHASE CONDUCTORS Sag (m)	Number	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Insulator Length (m)	Insulator Orientation
1	245	0	5	32.5	0.05	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	-120	-5	29.75	0.05	1	2.357	0	2.1	Horizontal
	245	120	5	27	0.05	1	2.357	0	2.1	Horizontal
2										Vertical
										Vertical
										Vertical
Shield Wire 1			4.3	35.5	0.03		1.28			
2			-4.3	35.5	0.03		1.28			

Load Data / Save Data / View / Advanced Options

Tower Footing Resistance Description ------ (See Help)
Low Frequency No-Ionization Footing Resistance (Ω): 2.233
Earth Resistivity (Ω/m):
Earth Critical Ionization Gradient (kV/m):
Korsuncev's S Dimension (m):
Account for Earth Ionization: Yes / No

Calculate / Clear / Demo

```
                LIGHTNING PERFORMANCE
Single circuit line with 2 shield wires
Span length: 60 m
Ground Flash Density: 13.0 flashes per square km per year
Tower Surge Impedance: 200 ohm
Wave velocity down the tower: 300 meter/microsecond
Strike Distance Equation used: Strike Distance = 10.0*h^0.00*I^0.65
       (h is the height of the wire, I is the current of the stroke)
No account is made for soil ionization.

                    PHASE WIRE DESCRIPTION
    .      Ph-to-Ph   Phase   Horizontal   Height   .        --- SUBCONDUCTORS ---      ----Insulator-----
Circuit    Voltage    Angle    Distance    AtTower   Sag   Number   Diameter   Spacing   Length   Orientation
 (#)        (kV)     (degree)     (m)         (m)     (m)   .          (cm)       (cm)      (m)     (See note)
 ---        ----     ------     -----       -----    ----   ----     -----      -----     -----       ----
   1         245         0       5.0         32.5    0.1      1      2.36       0.0       2.10         2
   1         245      -120      -5.0         29.8    0.1      1      2.36       0.0       2.10         2
   1         245       120       5.0         27.0    0.1      1      2.36       0.0       2.10         2

      SHIELD WIRE DESCRIPTION
Horizontal Height
 Distance AtTower Sag  Diameter
   (m)      (m)    (m)    (cm)
  -----    -----  -----   -----
 4.3       35.5     0.0     1.28
 -4.3      35.5     0.0     1.28

   RESULTS OF LIGHTNING PERFORMANCE CALCULATIONS
   ---------------------------------------------

Flashes to phase wires (shielding failures): 0.1 per 100 km per year
                    Flashes to shield wire: 231.7 per 100 km per year
        Total number of flashes to the line: 231.8 per 100 km per year

Minimum current for flashover after a shielding failure: 6 kA
There are no backflashovers, even with the highest possible stroke current

    Flashovers caused by shielding failures: 0.1 per 100 km per year
                                Backflashovers: 0.0 per 100 km per year
                Total number of flashovers: 0.1 per 100 km per year

    Breakdown by Phase
    ------------------
   .      Shielding    Shiel.Fail.
 Phase    Failures     Flashovers   Backflashovers
  (#)   (1/100kmYear) (1/100kmYear) (1/100kmYear)
   1         0.1           0.1           0.0
   2         0.0           0.0           0.0
   3         0.0           0.0           0.0

Total        0.1           0.1           0.0
```

14 REFERENCIAS

[1] IEB, *CAM-LT-CIV-IN-002 "Estudio Metereológico",* Medellín, 2025.

[2] Comisión de Regulación de Energía y Gas. CREG, Resolución 098-2000. Modificación del Anexo CC1 del Código de Conexión (CREG 025-1995), 2000.

[3] Ingeniería Especializada S.A., «CAM-LT-ELM-MC-003 "Memoria de Selección de conductor de fase aéreo",» 2025.

[4] Ingeniería Especializada S.A., «CAM-LT-ELM-MC-004 "Memoria de Selección de cables de guarda",» 2025.

[5] IEB, «CAM-LT-ELM-MC-006 MEMORIA DE DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA,» 2026.

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std 1313.2 - Guide For The Application Of Insulation Coordination, IEEE.

[7] ELECTRICAL POWER RESEARCH INSTITUTE – EPRI, Transmission Line Reference Book 200 kV and Above/Third Edition., USA: EPRI, 2005.

[8] IEC, IEC 60815-1 Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles, 2008.

[9] IEC, IEC 60071-2 Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines, 2018.

[10] IEC, «IEC 60060 - High - Voltage test tecniques - All Parts,» 2023.

[11] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-1. Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, 8.0 ed., Geneva: IEC, 2006.

[12] Friedrich Kiessling, Peter Nefzger, Ulf Kaintzyk, Joao Felix NolascoF. Kiessling, “Overhead Power Lines: Planning, Design,Construction” Springer Science & Business Media, 26/02/2003, 2003.

[13] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC, IEEE 1243. GUIDE FOR IMPROVING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES, Nueva York (USA), 1997.

[14] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std 1313.1-Standard for Insulation Coordination - Definitions, Principles, and Rules, IEEE, 2002.