



**EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN  
ESP**

Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización  
y Laboratorios

GM-03

Guía Metodológica: coordinación de aislamiento para redes de  
distribución.

EPM-UCET-NYL-GM-03

Agosto 2019

### Elaboración, Revisión y Aprobación

Actividad	Tema	Nombre
<b>Elaboró</b>	Guía Metodológica GM-03: coordinación de aislamiento para redes de distribución	Consultoría Colombiana S.A
	<b>Revisó</b>	José Daniel Acosta Moreno
	<b>Aprobó</b>	Mónica Rueda Aguilar

### Requeridores

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

### Revisiones

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

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

## CONTENIDO

1	OBJETO .....	6
2	ALCANCE.....	7
3	DOCUMENTOS DE REFERENCIA .....	8
4	DEFINICIONES .....	9
5	GENERALIDADES .....	11
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LA RED.....	11
5.1.1	Origen y clasificación de las tensiones soportadas.....	11
5.1.2	Características del aislamiento .....	12
5.2	NIVELES DE AISLAMIENTO NORMALIZADOS.....	12
6	METODOLOGÍA PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO .....	16
6.1	COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA EQUIPOS CON DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES - DPS .....	16
6.1.1	Nivel de protección de los DPS .....	17
6.1.2	Determinación de las tensiones de coordinación $V_{cw}$ .....	17
6.1.3	Determinación de las tensiones de soportabilidad requeridas $V_{rw}$ .....	20
6.1.4	Selección del nivel de aislamiento normalizado .....	20
6.2	COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA REDES DE DISTRIBUCIÓN SIN ELEMENTOS DE PROTECCIÓN.....	20
6.2.1	Tensiones de coordinación temporales de corta duración .....	21
6.2.2	Tensiones de coordinación de frente rápido .....	23
7	EJEMPLOS .....	26
7.1	COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA UN TRANSFORMADOR DE 13.2 KV EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL GRUPO EPM.....	26
7.1.1	Determinación de las tensiones de coordinación $V_{cw}$ .....	26
7.1.2	Determinación de las sobretensiones de soportabilidad requeridas.....	29
7.1.3	Selección del nivel de aislamiento asignado.....	30
7.1.4	Selección de aisladores.....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles de aislamiento normalizados para la gama I IEEE Std C.62.82.1-2010 [4]	13
Tabla 2 Niveles de aislamiento normalizados para la gama I IEC 60071-1 [1]	14
Tabla 3 Sobretensión fase-tierra debido a una falla monofásica de acuerdo con el régimen de conexión del neutro [5]	17
Tabla 4 Factor A para los diferentes tipos de líneas aéreas [6]	19
Tabla 5 Tensiones de soportabilidad normalizadas de referencia para el Grupo EPM	21
Tabla 6 Distancias de fuga recomendadas [7]	22
Tabla 7 Correlación entre tensiones no disruptivas normalizadas al impulso de rayo y distancias en el aire mínimas [6]	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Determinación de los niveles de aislamiento normalizados [7].....	16
Figura 2 Diagrama de conexión del DPS al objeto protegido [6] .....	19
Figura 3 Ejemplo de cálculo de la distancia equivalente de separación entre el DPS y el elemento a proteger.....	28

## 1 OBJETO

Establecer el procedimiento para la selección y coordinación de aislamiento en los sistemas de distribución de energía, en el cual se determinen los niveles de aislamiento eléctrico adecuados para los equipos e instalaciones eléctricas (Trifásicas, bifásicas o monofásicas) y la selección de los dispositivos de protección.



## 2 ALCANCE

La presente guía metodológica está orientada a la selección de los equipos de protección y la validación de las normas y especificaciones técnicas de EPM, así como la definición de criterios para realizar una adecuada coordinación de aislamiento en sistemas de distribución de energía.

### 3 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Para la elaboración de la presente guía metodológica se consultaron los siguientes documentos:

- [1] Insulation co-ordination. IEC 60071-1 International Electrotechnical Commission. 2011.
- [2] Subestaciones de alta y extra alta tensión. HMV Ingenieros. Segunda edición 2003.
- [3] Norma Técnica Colombiana NTC 3328. Coordinación de aislamiento. Definiciones principios y reglas. ICONTEC. 1999.
- [4] IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules. IEEE Std C62.82.1. IEEE power and energy society. 2010.
- [5] IEEE Guide for the Application of metal-oxide surge arrester for alternating-current systems IEEE C62.22-2009
- [6] Insulation co-ordination. IEC 60071-2 International Electrotechnical Commission. 2018.
- [7] Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles. IEC 60815-1. 2018.
- [8] Guía Técnica Colombiana NTC 262. Electrotecnia Guía para la selección de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias (DPS) en transformadores de distribución. ICONTEC 2016.
- [9] IEEE Guide for the application of insulation coordination. IEEE Std 1313.2-1999.

## 4 DEFINICIONES

**Aislamiento autorregenerable y aislamiento no autorregenerable:** se denomina aislamiento regenerable a aquel que recupera íntegramente sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva y no autorregenerable al que las pierde o no las recupera íntegramente.

**Aislamiento externo y aislamiento interno:** aislamiento interno se refiere a distancias en el aire y las superficies en contacto con el aire de los aislamientos sólidos de un equipo, expuestos a la influencia de las condiciones ambientales u otros agentes externos tales como polución, humedad, entre otros. Aislamiento interno se denomina a los elementos internos sólidos, líquidos o gaseosos del aislamiento de un equipo que están protegidos de la influencia de las condiciones ambientales u otros agentes externos.

**Dispositivo de protección contra sobretensiones (DPS):** dispositivo que limita los valores de cresta de las sobretensiones, o sus duraciones o ambos. Estos dispositivos se clasifican en dispositivos de prevención (tal como resistencia de preinserción) o en dispositivos de protección (tal como pararrayos).

**Nivel de aislamiento normalizado:** conjunto de tensiones soportadas normalizadas que caracterizan la rigidez dieléctrica del aislamiento.

**Máxima tensión continua de operación (MCOV):** valor eficaz máximo permitido de tensión a frecuencia industrial que podría ser aplicado continuamente entre los terminales del DPS.

**Margen de protección:** diferencia entre la rigidez dieléctrica del aislamiento del equipo y el nivel de protección del DPS.

**Red con neutro aislado:** red en la que ningún punto neutro está intencionalmente conectado a la tierra, a excepción de las conexiones a alta impedancia destinadas a dispositivos de protección o de medida.

**Red con neutro puesto directamente a tierra:** red cuyo(s) punto(s) neutros están conectados directamente a tierra

**Sobretensión:** las diferencias de potencial transitorias o permanentes existentes entre fases o entre fase y tierra en una instalación, con un valor de cresta mayor a la tensión máxima del sistema. Estas diferencias de potencial son capaces de poner en peligro el material aislante o el adecuado servicio de una red eléctrica.

**Tensión nominal de una red ( $V_n$ ):** valor aproximado adecuado de la tensión utilizada para designar o identificar una red.

**Tensión máxima del sistema ( $V_m$ ):** valor eficaz máximo de la tensión entre fases para el cual está especificado el material en relación con su aislamiento, así como a algunas otras características que están provisionalmente conectadas a esta tensión en las normas propuestas para cada material.

**Tensión continua de operación (a frecuencia industrial):** tensión a la frecuencia del sistema, considerada que tiene un valor eficaz constante, aplicada permanentemente a cualquier par de terminales de una configuración de aislamiento.

**Tensión soportada para impulso tipo rayo BIL:** es el valor pico de tensión soportada al impulso tipo rayo, el cual caracteriza el aislamiento del equipo en lo que refiere a pruebas.

**Tensión soportada para impulso tipo corta duración a frecuencia industrial:** es la tensión que puede tener su origen en fallas, en operaciones de maniobra tales como pérdida de carga, condiciones de resonancia, no linealidades (ferroresonancia), o en una combinación de estos.

## 5 GENERALIDADES

La coordinación de aislamiento consiste en la selección de un conjunto de tensiones soportadas normalizadas para caracterizar el aislamiento de equipos, en función de las sobretensiones que podrían aparecer en el sistema, teniendo en cuenta las condiciones ambientales y las características de los dispositivos de protección disponibles [1].

Se han desarrollado dos enfoques principales para realizar el estudio de coordinación de aislamiento: el estadístico y el determinístico. A continuación, se describe cada uno de ellos.

El método estadístico determina el nivel de aislamiento por medio de una tasa de falla definida, valiéndose de la aleatoriedad tanto de las sobretensiones como del comportamiento de los materiales frente a estas. Los resultados obtenidos tienden a ser más precisos que los del método determinístico, lo que se traduce en una reducción en los costos de aislamiento. Este método se usa particularmente en sistemas con tensiones nominales por encima de 300 kV.

El método determinístico consiste en establecer las sobretensiones máximas a las que se someterá el sistema, para seleccionar el mínimo nivel de aislamiento requerido para equipos aplicando un margen que cubra las incertidumbres inherentes a la determinación de estos valores [2]. Existen algunos procedimientos definidos para determinar los factores de seguridad, sin embargo, la experiencia del ingeniero de diseño para evaluar los resultados tiene un papel importante en este método.

El procedimiento determinístico para la coordinación del aislamiento es suficientemente preciso para estudios en sistemas de distribución de energía [3]. La simplicidad del método, el hecho de no requerir información estadística de la tasa de falla del aislamiento y la precisión de los resultados obtenidos, hacen que la presente guía metodológica se desarrolle con este enfoque de trabajo.

Antes de realizar la coordinación de aislamiento es necesario caracterizar el sistema eléctrico.

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RED

Inicialmente se debe caracterizar el sistema eléctrico, considerando los siguientes aspectos fundamentales.

#### 5.1.1 Origen y clasificación de las tensiones soportadas

Se deben determinar las sobretensiones que tienen mayor incidencia en el caso estudiado. En sistemas eléctricos se presentan los cinco tipos de sobretensiones que se enumeran a continuación junto con sus posibles causas. Las sobretensiones subrayadas son las que deben considerarse para efectos de la presente guía metodológica, porque son las que tienen mayor impacto en sistemas de distribución de energía.

- a. Tensiones continuas a frecuencia industrial
- b. **Sobretensiones temporales**
  - Por fallas a tierra

- Por rechazo de carga
  - Por resonancia y ferresonancia
  - Por sobretensiones longitudinales durante sincronización
  - Por combinaciones de sobretensiones temporales
- c. Sobretensiones de frente lento
- Por energización y recierres de líneas
  - Por fallas y despeje de fallas
  - Por rechazo de carga
  - Por maniobras de corrientes inductivas y capacitivas
  - Por descargas eléctricas atmosféricas de frente lento
- d. **Sobretensiones de frente rápido**
- Por descargas eléctricas atmosféricas
- e. Sobretensiones de frente muy rápido

Para la coordinación de aislamiento en sistemas de distribución de energía del grupo EPM se deben contemplar mínimo las sobretensiones temporales por falla a tierra y de frente rápido por descargas eléctricas atmosféricas.

### 5.1.2 Características del aislamiento

Se debe establecer si el sistema eléctrico estudiado tiene aislamiento autorregenerable, no autorregenerable, interno y/o externo.

## 5.2 NIVELES DE AISLAMIENTO NORMALIZADOS

El ANSI (*American National Standards Institute*) y la IEC (*International Electrotechnical Commission*) desarrollaron en paralelo estudios para la normalización de los niveles de aislamiento para equipos y bajo estos estándares se fabrican los elementos de los sistemas eléctricos alrededor del mundo. Siempre que se van a especificar equipos eléctricos, es necesario definir un nivel de aislamiento normalizado de acuerdo con una de estas normatividades.

La clasificación de los niveles de aislamiento se hace en función de la tensión  $V_m$ , que corresponde al valor eficaz máximo de la tensión entre fases del sistema. Los niveles de aislamiento se clasifican de la siguiente forma [1]:

- *Gama I*: Sistemas con  $V_m$  de 1 kV hasta 245 kV.
- *Gama II*: Sistemas con  $V_m$  por encima de 245 kV.

El alcance de esta guía metodológica cubre únicamente los sistemas eléctricos en la *Gama I*.

En la Tabla 1 y la Tabla 2 se presentan los niveles de aislamiento normalizados de acuerdo con el IEEE (ANSI) y la IEC respectivamente.

**Tabla 1 Niveles de aislamiento normalizados para la gama I IEEE Std C.62.82.1-2010 [4]**

<b>Tensión máxima del sistema (fase - fase) <math>V_m</math> kV, rms</b>	<b>Nivel básico de aislamiento para impulso tipo rayo (fase - tierra) BIL kV, pico</b>	<b>Tensión de soportabilidad para impulsos de corta duración a frecuencia industrial (fase - fase) kV, valor rms</b>
15	95 110	34
26.2	125 150	40 50
36.2	150 200	50 70
48.3	250	95
72.5	250 350	95 140
121	350 450 550	140 185 230
145	450 550 650	185 230 275
169	550 650 750	230 275 325
242	650 750 825 900 975 1050	275 325 360 395 480

**Tabla 2 Niveles de aislamiento normalizados para la gama I IEC 60071-1 [1]**

Tensión más elevada para equipos $V_m$ [kV] (valor rms)	Tensión de soportabilidad normalizada para impulsos de corta duración a frecuencia industrial [kV] (valor rms)	Tensión de soportabilidad normalizada para impulsos tipo rayo [kV] (valor pico)
3.6	10	20
		40
7.2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17.5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72.5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

NOTA – Si los valores entre paréntesis son insuficientes para probar que las tensiones soportadas especificadas entre fases se cumplen, se requieren ensayos complementarios de tensiones soportadas entre fases.

Las diferencias entre los valores normalizados mostrados en las tablas anteriores se deben fundamentalmente a que estos estándares se construyeron desde dos ópticas diferentes; mientras el ANSI empleó datos históricos de las sobretensiones en el sistema eléctrico estadounidense combinados con un análisis estadístico, la IEC realizó la normalización a partir del estudio de los fenómenos electromagnéticos que se presentan durante una sobretensión.

Las sobretensiones de soportabilidad requeridas para los equipos de un sistema eléctrico (Calculados por medio del procedimiento que se describirá más adelante), representan el mínimo valor de aislamiento con el que deben contar los elementos del sistema estudiado, cualquier valor mayor a este límite es aceptable, sin embargo se recomienda seleccionar el nivel de aislamiento normalizado por encima y más próximo a las sobretensiones de soportabilidad requeridas, independientemente del estándar bajo el cual se hayan definido (ANSI o IEC).

La norma técnica colombiana [3] es una adaptación de la norma europea [1] y los valores estandarizados para el nivel de aislamiento que allí se presentan son idénticos a los de la Tabla 2.

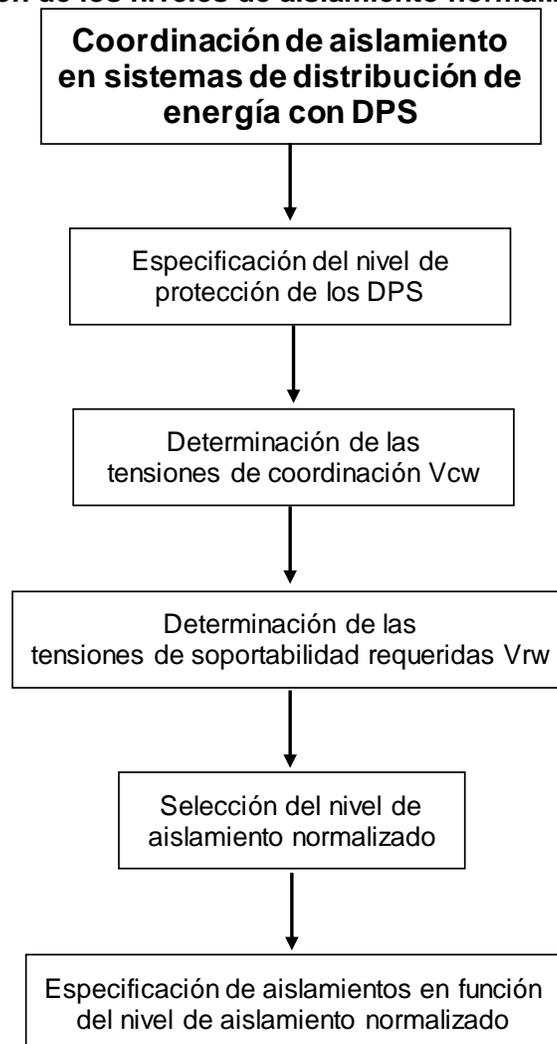
## 6 METODOLOGÍA PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

En este documento se proponen dos enfoques metodológicos para realizar la coordinación de aislamiento, uno para sistemas eléctricos protegidos con dispositivos de protección contra sobretensiones como transformadores, reconectores y redes protegidas con DPS y el segundo para redes de distribución sin elementos de protección contra sobretensiones.

### 6.1 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA EQUIPOS CON DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES - DPS

En este capítulo se describe el paso a paso de la coordinación de aislamiento con el método determinístico enfocado en equipos de sistemas de distribución de energía protegidos con DPS. En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo que especifica el procedimiento para la determinación de los niveles de aislamiento normalizados.

**Figura 1 Determinación de los niveles de aislamiento normalizados [7].**



### 6.1.1 Nivel de protección de los DPS

Se deben definir la tensión residual al impulso tipo rayo (LPL) y la tensión residual al impulso tipo maniobra (FOW) del DPS seleccionado, las dos tensiones expresadas en kV. Estos valores deben ser especificados por el fabricante del equipo [1]. Para la selección del DPS se recomienda consultar el documento *norma técnica NT-03: selección de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS)*.

### 6.1.2 Determinación de las tensiones de coordinación $V_{cw}$

Una vez se tiene caracterizado el sistema objeto de estudio, se deben determinar la magnitud de las tensiones de coordinación  $V_{cw}$  como se muestra a continuación.

#### 6.1.2.1 Tensiones de coordinación temporales de corta duración

Las fallas de fase a tierra generalmente originan las mayores sobretensiones temporales en los sistemas de distribución de energía. La magnitud de las sobretensiones que se presentan durante una de estas fallas depende en gran medida del régimen de conexión del neutro. En la Tabla 3 se presentan los valores de referencia para la magnitud de la sobretensión en los diferentes regímenes de conexión.

**Tabla 3 Sobretensión fase-tierra debido a una falla monofásica de acuerdo con el régimen de conexión del neutro [5]**

Sistema	Magnitud de la sobretensión sobre la tensión fase-tierra nominal de sistema, $E_{LG}$
Tres cables con alta resistencia a tierra o sistemas en delta	1.73
Cuatro cables con baja resistencia y múltiple conexión a tierra	1.25
Cuatro cables con alta resistencia y múltiple conexión a tierra	1.35
Tres cables con baja resistencia a tierra y puesto a tierra sólo en los extremos	1.4

Nota: Para las redes de distribución de energía del grupo EPM se consideran sistemas con alta resistencia a tierra los que presenten valores mayores a  $20 \Omega$  y con baja resistencia a tierra los que tengan valores iguales o menores a  $20 \Omega$ .

En la Ecuación 1 se da la expresión para el cálculo de las tensiones de coordinación temporales de corta duración debida a fallas fase-tierra.

$$V_{cw (temporales)} = V_{Ln} * E_{LG} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$V_{cw}$  : es la tensión no disruptiva de coordinación al impulso temporal de corta duración.

$V_{Ln}$  : es la tensión fase – tierra del sistema.

$E_{LG}$  : es el factor para el cálculo de la sobretensión dado en la Tabla 3

### 6.1.2.2 Tensiones de coordinación de frente rápido

Para efectos de la presente guía metodológica, las tensiones de coordinación de frente rápido se caracterizan empleando el método simplificado presentado en el Anexo E de la norma IEC 60071-2. Las tensiones de coordinación de frente rápido debidas a impulso tipo rayo se obtienen de la Ecuación 2 y Ecuación 3, que aplican para aislamiento interno y externo respectivamente.

$$V_{cw} (\text{frente rápido aislamiento interno}) = LPL + \frac{A}{n} * \frac{L(\text{aislamiento interno})}{L_{sp} + L_a} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_{cw} (\text{frente rápido aislamiento externo}) = LPL + \frac{A}{n} * \frac{L(\text{aislamiento externo})}{L_{sp} + L_a} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- $V_{cw}$ : es la tensión no disruptiva de coordinación al impulso tipo rayo [kV].
- LPL: es la tensión residual al impulso tipo rayo del DPS seleccionado [kV] (Dato suministrado por el fabricante).
- A: factor calculado con la Tabla 4.
- n: es el número mínimo de redes de distribución conectadas a la subestación que permanecen en servicio durante una tormenta eléctrica.
- L: es la distancia equivalente de separación entre el DPS y el elemento a proteger [m], calculada como se ilustra en la Figura 2 ( $L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ ).
- $L_{sp}$ : es la longitud del vano [m].
- $L_a$ : es la sección de la línea aérea con una tasa de salidas igual a la tasa de falla aceptable. Se calcula con la Ecuación 4 y se debe expresar en metros [m].

$$L_a = R_a / R_{km} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$R_a$ : Es la tasa de fallas máxima tolerable [fallas/año]. Estos valores se definieron en la *guía metodológica GT-04: protección contra rayos en redes de distribución de energía*; sin embargo, se muestran a continuación:

Nivel de tensión II: 15 fallas -año

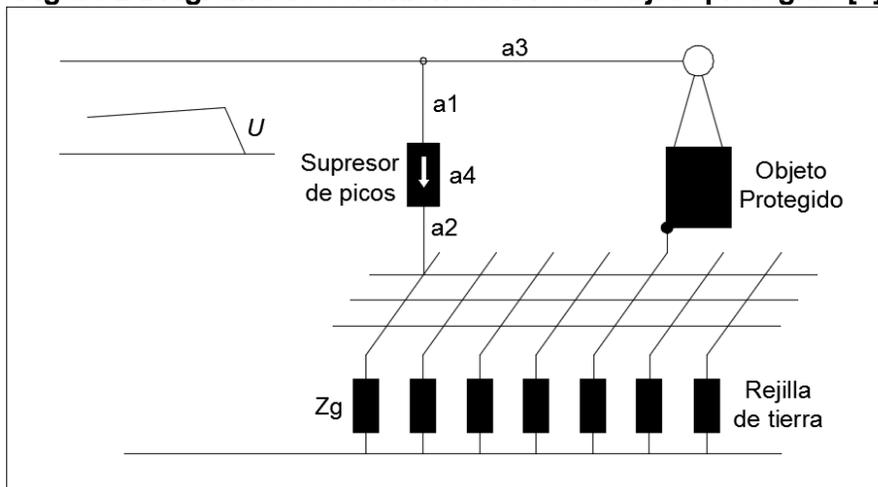
Nivel de tensión III: 11 fallas -año

$R_{km}$ : es la tasa de salidas por año observadas para el primer kilómetro de la línea aérea a la salida de la subestación, obtenida de datos históricos de confiabilidad de la red estudiada (Unidad usual: [fallas/100 km - año]; unidad recomendada para este cálculo: [fallas/m - año]).

**Tabla 4 Factor A para los diferentes tipos de líneas aéreas [6]**

Tipo de línea	A (kV)
<i>Líneas de distribución (flameo entre fases):</i>	
Con crucetas puesta a tierra (flameo a tierra a baja tensión)	900
Líneas sobre postes de madera (flameo a tierra a alta tensión)	2700
<i>Líneas de transmisión (flameo en una fase a tierra):</i>	
Conductor sencillo	4500
Haz de dos conductores	7000
Haz de cuatro conductores	11000
Haz de seis y ocho conductores	17000

Como se mencionó anteriormente la distancia equivalente  $L$  se obtiene a partir de la suma de las distancias mostradas en la Figura 2.

**Figura 2 Diagrama de conexión del DPS al objeto protegido [6]**


Donde:

$a_1$ : es la longitud entre el punto de conexión del DPS y la línea [m].

$a_2$ : es la longitud de la conexión a tierra del descargador de sobretensiones [m].

$a_3$ : es la longitud del conductor de fase entre el descargador de sobretensiones y el aislamiento del equipo a proteger [m] (normalmente presenta un valor para el aislamiento interno y otro para el aislamiento externo).

$a_4$ : Es la longitud del descargador de sobretensiones [m].

Debido a que la distancia  $a_3$  presenta un valor para el aislamiento interno y otro para el aislamiento externo, se tienen dos valores correspondientes de la distancia equivalente  $L$  y se trabaja con dos tensiones correspondientes ( $V_{cw}$ ), una para el aislamiento interno y otra para el externo.

### 6.1.3 Determinación de las tensiones de soportabilidad requeridas $V_{rw}$

Las tensiones de soportabilidad requeridas  $V_{rw}$  se obtienen aplicando factores de seguridad a las tensiones calculadas de coordinación  $V_{cw}$  y se realizan cálculos por separados para el aislamiento interno y externo. En el caso del aislamiento externo, adicionalmente se debe usar un factor de corrección por altura sobre el nivel de mar. A continuación, se presentan las expresiones para el cálculo de las tensiones de soportabilidad requeridas  $V_{rw}$ .

La Ecuación 5 permite calcular las tensiones de soportabilidad requeridas para el aislamiento interno y la Ecuación 6 para el aislamiento externo.

$$V_{rw} = V_{cw} * 1.15 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$V_{rw} = V_{cw} * 1.05 * k_a \quad \text{Ecuación 6}$$

$k_a$  es el factor de corrección por altura sobre el nivel del mar y se calcula con la Ecuación 7.

$$k_a = e^{\frac{m * H}{8150}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$m=1$  para la coordinación de tensiones soportadas al impulso tipo rayo

H: es la altitud sobre el nivel del mar (en metros).

### 6.1.4 Selección del nivel de aislamiento normalizado

Una vez se han determinado las sobretensiones de soportabilidad requeridas para el aislamiento interno y externo, se debe seleccionar un nivel de aislamiento normalizado que sea superior a estos límites (Ver Tabla 1 y Tabla 2). Se recomienda seleccionar el nivel de aislamiento inmediatamente mayor a las tensiones de soportabilidad encontradas independientemente del estándar empleado.

## 6.2 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA REDES DE DISTRIBUCIÓN SIN ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

La coordinación de aislamiento en redes de distribución de energía consiste en la especificación de las características de aisladores y las distancias mínimas en el aire (fase - tierra y fase - fase) requerida para soportar las sobretensiones a las que estará expuesto el sistema. En este apartado se define la metodología para especificar las características mínimas requeridas en las redes de distribución del Grupo EPM cuando no se cuenta con dispositivos de protección contra sobretensiones - DPS aguas arriba del aislamiento. En la Tabla 5 se presentan las tensiones de soportabilidad de referencia para especificar el aislamiento en las redes de distribución del Grupo EPM en estos casos.

**Tabla 5 Tensiones de soportabilidad normalizadas de referencia para el Grupo EPM**

Tensión nominal kV $V_{línea}$	Tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo kV (valor cresta)
13.2	38	95
33/34.5	70	170
44	95	250

Nota: Las tensiones de soportabilidad normalizadas de referencia que se presentan en la Tabla 5 son las mínimas aceptadas para especificar las características de aislamiento en redes de distribución de energía sin dispositivos de protección contra sobretensión – DPS aguas arriba del aislamiento a especificar y no pueden ser generalizadas para los casos en los que aplica el análisis presentado en el capítulo 6.1 de este documento.

El aislamiento se dimensiona a partir de las sobretensiones esperadas en el sistema como se muestra a continuación.

### 6.2.1 Tensiones de coordinación temporales de corta duración

En este capítulo se evalúa el efecto de las sobretensiones temporales para el caso de elementos sin protección.

#### 6.2.1.1 Selección de aisladores

La tensión continua de operación, las sobretensiones temporales y el grado de contaminación del ambiente determinan la longitud de la cadena de aisladores y la forma de los elementos que la componen. En sistemas con neutro directamente puesto a tierra (Factores de falla a tierra bajos), normalmente es suficiente diseñar los aisladores para que soporten la mayor tensión del sistema de fase a tierra. Para factores de falla a tierra superiores, y especialmente en sistemas con neutro aislado o compensados con una bobina de extinción, es necesario tener en cuenta las sobretensiones temporales. [6].

Uno de los parámetros para especificar los aisladores es la distancia de fuga, que corresponde a la distancia más corta que debe recorrer la corriente sobre el aislador para producir una falla monofásica a tierra. La distancia de fuga se calcula con la Ecuación 8.

$$Distancia\ de\ fuga = V_{aislador} * K_a * \Delta_{fuga} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$V_{aislador}$  es la tensión máxima soportada por el aislador.

$K_a$  es el factor de corrección por altura sobre el nivel del mar definido en la ecuación 7.

$\Delta_{fuga}$  es la distancia de fuga específica nominal mínima para el nivel de contaminación de la zona [mm/kV] dados en la Tabla 6.

Como se mencionó anteriormente  $V_{aislador}$  es igual a:

- $V_{Ln} * 1.1$  para sistemas con neutro corrido, multiaterrizado y neutro puesto a tierra.
- $V_{cw}$  (temporales) para sistemas con neutro aislado.

**Tabla 6 Distancias de fuga recomendadas [7].**

Nivel de contaminación	Ejemplos de ambientes típicos	Distancia de fuga específica nominal mínima mm/kV <sup>(1)</sup>
I - Muy ligera	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas sin densidad de industrias, pero sometidas a vientos y/o lluvias frecuentes.</li> <li>- Todas estas áreas deben estar situadas a más de 20 km del mar y no deben estar expuestas directamente a los vientos provenientes del mar <sup>3)</sup>.</li> </ul>	12,7
II - Ligera	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas sin industrias y de baja densidad de casas equipadas con plantas de calentamiento.</li> <li>- Áreas con baja densidad de industrias o casas, pero sometidas a vientos y/o lluvias frecuentes.</li> <li>- Áreas agrícolas<sup>2)</sup></li> <li>- Áreas montañosas.</li> <li>- Todas estas áreas deben estar situadas al menos de 10 km a 20 km del mar y no deben estar expuestas directamente a los vientos provenientes del mar <sup>3)</sup>.</li> </ul>	16,0
III - Media	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas con industrias que no producen humo particularmente contaminante y/o con una densidad promedio de casas equipadas con plantas de calentamiento.</li> <li>- Áreas con alta densidad de casas y/o industrias sometidas a vientos y/o lluvias frecuentes.</li> <li>- Áreas expuestas al viento del mar, pero no demasiado cerca de las costas (al menos a varios kilómetros de distancia)<sup>3)</sup></li> </ul>	20,0
IV - Fuerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calentamiento que producen contaminación.</li> <li>- Áreas cercanas al mar, o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar.<sup>3)</sup></li> </ul>	25,0
V – Muy fuerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y a humo industrial, que producen depósitos conductores particularmente espesos.</li> <li>- Áreas generalmente de extensión moderada, muy cercanas a la costa y expuestas a la espuma del mar, o a vientos muy fuertes y vientos contaminantes provenientes del mar.</li> <li>- Áreas desiertas, caracterizadas por largos</li> </ul>	31,0

Nivel de contaminación	Ejemplos de ambientes típicos	Distancia de fuga específica nominal mínima mm/kV <sup>1)</sup>
	períodos sin lluvia, expuestas a vientos fuertes que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular.	

Nota: Se recomienda aplicar esta tabla solamente a aislamientos de vidrio o porcelana y no cubre algunas situaciones ambientales, tales como hielo y nieve en contaminación fuerte, lluvia fuerte, áreas áridas, entre otros.

1. De acuerdo con la IEC 815, la distancia de fuga mínima de los aisladores entre fase y tierra relacionada con la mayor tensión del sistema (entre fases).
2. El uso de fertilizantes mediante rociado, o el quemado de residuos de cosechas puede conducir a un nivel de contaminación mayor debido a dispersión por el viento.
3. Las distancias desde la costa dependen de la topografía del área costera y de las condiciones externas del viento.

### 6.2.1.2 Especificación de distancias mínimas en el aire

Las sobretensiones temporales no se tendrán en cuenta para la especificación de distancias mínimas en el aire para el caso de elementos sin protección.

### 6.2.2 Tensiones de coordinación de frente rápido

En este capítulo se evalúa el efecto de las sobretensiones de frente rápido para el caso de elementos sin protección.

En aislamientos autoregenerables la probabilidad de descarga se puede describirse mediante una curva característica de resistencia del aislamiento como la que se muestra en la Ecuación 9 [9].

$$BIL = CFO \left[ 1 - 1.28 * \frac{\sigma_F}{CFO} \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

En la relación anterior el BIL se define a partir de dos parámetros, la tensión de flameo crítico (CFO por sus siglas en inglés), que corresponde al 50% de probabilidad de descarga instantánea para una sola aplicación de impulso y la desviación estándar  $\sigma_F$ . La resistencia del aislamiento autoregenerable al impulso tipo rayo se modela con buena precisión a partir de una distribución gaussiana asumiendo el coeficiente  $\sigma_F/CFO$  igual al 3% [9], con lo que se tienen la siguiente relación.

$$BIL = CFO[1 - 1.28 * 0.03] \quad \text{Ecuación 10}$$

$$BIL = CFO[1 - 0.0384] \quad \text{Ecuación 11}$$

$$BIL = CFO[0.9616] \quad \text{Ecuación 12}$$

La Ecuación 12 es útil para verificar el nivel de soportabilidad al impulso tipo rayo (BIL) de aisladores a partir del CFO dado por los fabricantes y obtenido a partir de pruebas de laboratorio.

### 6.2.2.1 Selección de aisladores

Otro parámetro necesario para especificar los aisladores es la distancia de arco, que es la distancia mínima que debe recorrer la corriente por el aire para producir una falla fase tierra en el aislador. Esta distancia se especifica con la Tabla 7 a partir de los niveles de soportabilidad al impulso tipo rayo de referencia presentados en la Tabla 5.

Para los niveles de soportabilidad al impulso tipo rayo que abarca esta guía tanto las distancias mínimas de aislamiento fase-tierra como las de fase-fase se definen a partir de la configuración estructura – punta de la Tabla 7.

Se debe tener presente que, si en el diseño se emplean aisladores en cadenas de suspensión, es conveniente que las distancias en el aire entre fases tengan en cuenta el movimiento del conductor generado por el viento. [6].

**Tabla 7 Correlación entre tensiones no disruptivas normalizadas al impulso de rayo y distancias en el aire mínimas [6].**

Tensión no disruptiva normalizada al impulso de rayo KV	Distancia mínima en el aire mm	
	Estructura punta	Estructura conductor
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
200	380	
250	480	
325	630	
380	750	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
1050	1900	1700
1175	2100	1900

Tensión no disruptiva normalizada al impulso de rayo KV	Distancia mínima en el aire mm	
	Estructura punta	Estructura conductor
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900
2250	4500	4150
2400	4800	4450
2550	5100	4700
2700	5400	5000

Las distancias en el aire aquí definidas están orientadas únicamente a atender los requisitos de coordinación del aislamiento. Las distancias de seguridad suelen ser significativamente mayores porque incluyen otras consideraciones. Este tema se trata en el documento *Norma técnica NT-06: distancias de seguridad en redes de distribución*. [6]. Adicionalmente, para establecer las distancias mínimas entre fases en una estructura se deben atender todas las recomendaciones del documento *Guía metodológica GM-12: cálculos mecánicos de estructuras y elementos de sujeción Grupo EPM*.

#### 6.2.2.2 Especificación de distancias mínimas en el aire

Las distancias mínimas en el aire fase-fase y fase-tierra se especifican con la Tabla 7 a partir de los niveles de soportabilidad al impulso tipo rayo de referencia presentados en la Tabla 5.

## 7 EJEMPLOS

### 7.1 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA UN TRANSFORMADOR DE 13.2 KV EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL GRUPO EPM.

Se realizará la coordinación de aislamiento para una subestación en poste, aislada en aceite con los siguientes datos operativos:

Ubicación : Medellín, Antioquia.  
 Altitud : 1495 m.s.n.m.  
 Nivel de polución : Muy ligero.  
 Tensión nominal del sistema ( $V_r$ ) : 13.2 kV en Y.  
 Régimen de conexión del neutro : Sistema con neutro corrido y con puesta a tierra múltiple con baja resistencia de puesta a tierra.  
 Tensión residual al impulso tipo rayo del DPS seleccionado (LPL) : 42.9 kV  
 Tensión residual al impulso tipo maniobra del DPS seleccionado (FOW) : 41.5 kV  
 Número mínimo de redes de distribución conectadas a la subestación : 1.  
 Longitud media del vano ( $L_{sp}$ ) : 80 m  
 Tasa de fallas máxima tolerable ( $R_a$ ) : 15 fallas -año  
 Tasa de falla observada  $R_{km}$  : 5 fallas/100 km - año  
 Transformador aislado en aceite.  
 Las redes de distribución conectadas a la subestación se soportan en postes de concreto con cruceta metálica.

#### 7.1.1 Determinación de las tensiones de coordinación $V_{cw}$

De acuerdo con la presente guía metodológica para la coordinación de aislamiento en sistemas de distribución se deben considerar las sobretensiones temporales de corta duración y las sobretensiones de frente rápido.

##### 7.1.1.1 Tensiones de coordinación temporales de corta duración

De acuerdo con la Tabla 3 para sistemas con neutro corrido, baja resistencia y puesta a tierra múltiple, se tiene un  $E_{LG}$  de 1.25. entonces,

$$V_{cw (temporales)} = \frac{V_r}{\sqrt{3}} * E_{LG}$$

$$V_{cw (temporales)} = \frac{13.2}{\sqrt{3}} * 1.25$$

$$V_{cw (temporales)} = 9.53 \text{ kV}$$

### 7.1.1.2 Tensiones de coordinación de frente rápido

El cálculo de las sobretensiones de frente rápido se realiza con las siguientes expresiones:

$$V_{cw} (\text{frente rápido aislamiento interno}) = LPL + \frac{A}{n} * \frac{L(\text{aislamiento interno})}{L_{sp} + L_a}$$

$$V_{cw} (\text{frente rápido aislamiento externo}) = LPL + \frac{A}{n} * \frac{L(\text{aislamiento externo})}{L_{sp} + L_a}$$

De los datos de entrada se conoce que LPL es 42.9 kV, n=1, L<sub>sp</sub>=80 m y R<sub>km</sub>= 5 fallas/100 km - año.

Como el sistema de distribución emplea postes de concreto con crucetas metálicas de la Tabla 4 se obtiene que A= 900 kV.

En los sistemas de distribución de EPM a 13.2 kV la tasa de falla tolerable es de R<sub>a</sub>=15 fallas/año y R<sub>km</sub> se puede expresar como:

$$\frac{5}{100.000} \frac{[fallas]}{[m - año]} = 5 \times 10^{-5} \text{ fallas/m} - \text{año}$$

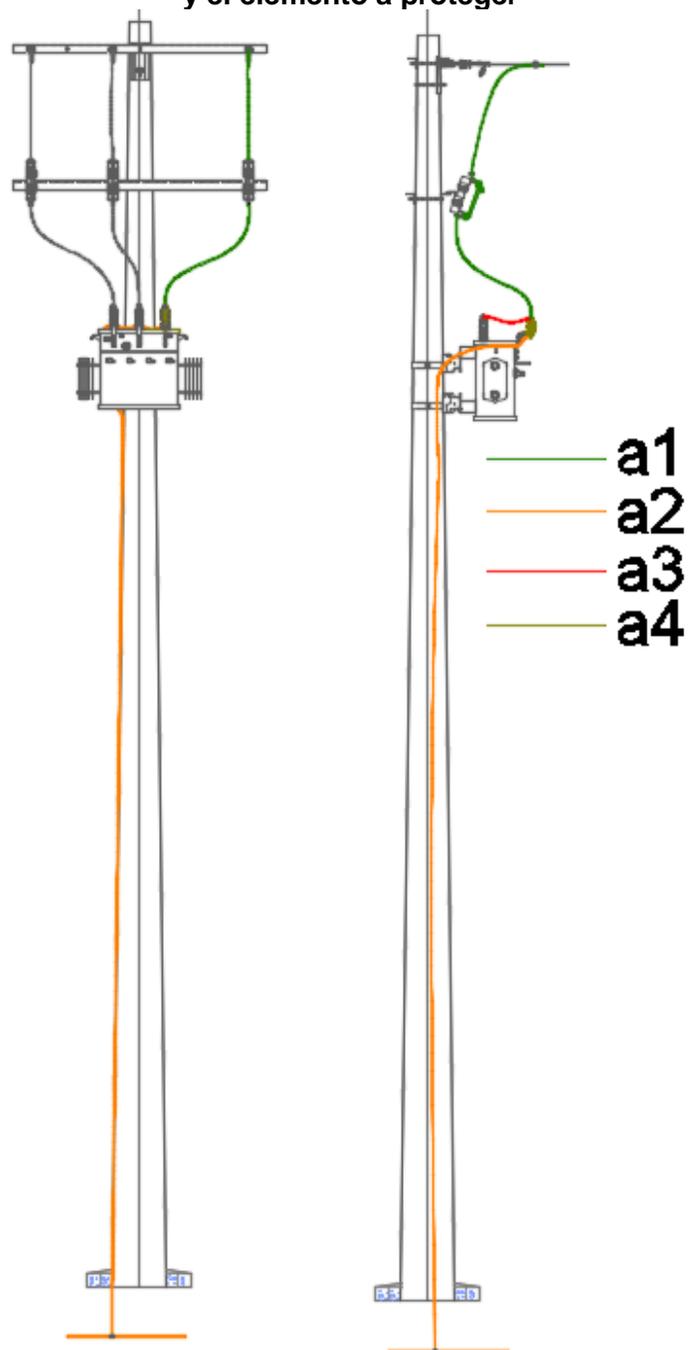
Con lo que se obtiene un L<sub>a</sub> de:

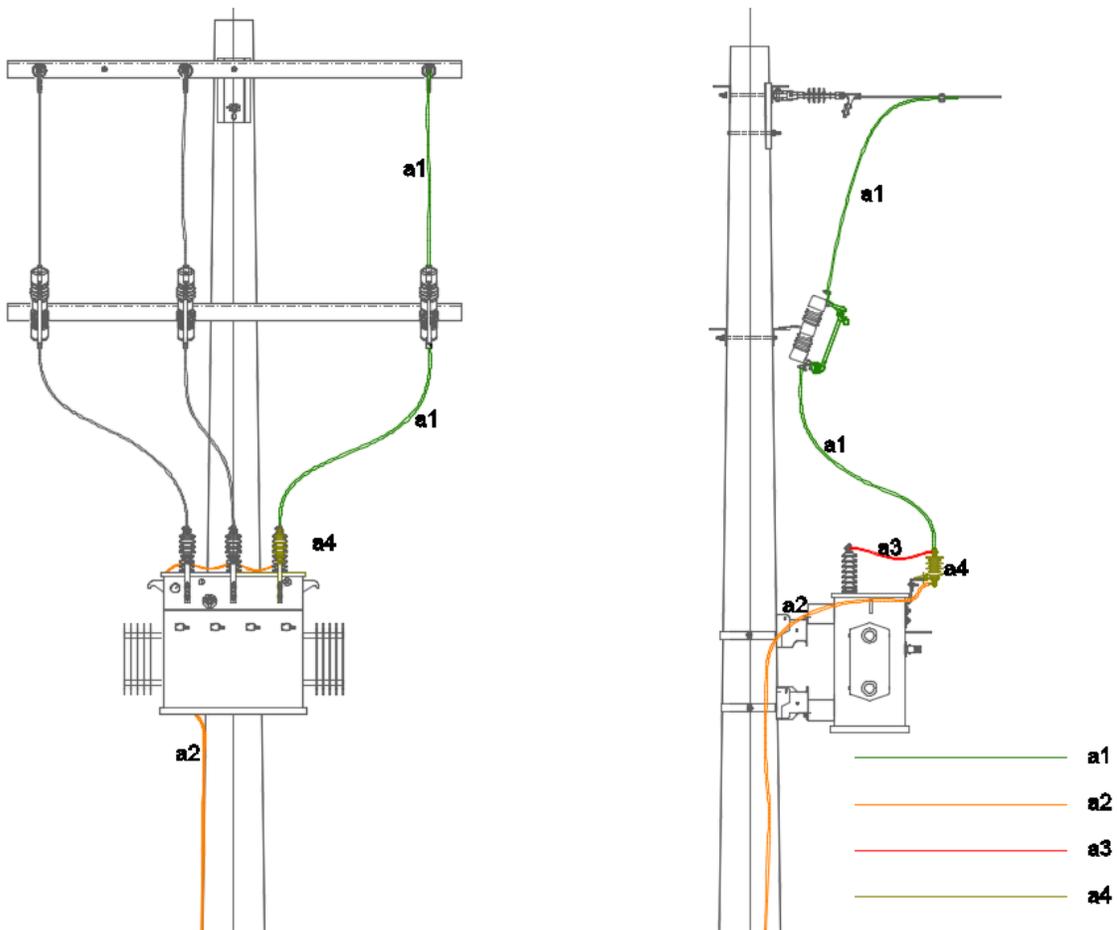
$$L_a = R_a / R_{km}$$

$$L_a = \frac{15}{5 \times 10^{-5}} = 300000 \text{ m}$$

Con el procedimiento mostrado en la Figura 2 se calcula L<sub>interno</sub> y L<sub>externo</sub> como se muestra en la Figura 3, para el aislamiento externo la distancia a<sub>3</sub> se mide hasta los bujes del transformador, mientras que para el aislamiento interno a<sub>3</sub> se mide hasta la cuba de este (donde se almacena el aislante de los devanados que no está expuesto a las condiciones ambientales).

**Figura 3 Ejemplo de cálculo de la distancia equivalente de separación entre el DPS y el elemento a proteger**





$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$$

Del análisis anterior se obtiene que  $L_{(\text{aislamiento externo})} = 13.5 \text{ m}$  y  $L_{(\text{aislamiento interno})} = 14.5 \text{ m}$ , por lo tanto, se tiene

$$V_{cw} (\text{frente rápido aislamiento interno}) = 42.9 \text{ kV} + \frac{900 \text{ kV}}{1} * \frac{14.5 \text{ m}}{80 \text{ m} + 300000 \text{ m}} = 42.943 \text{ kV}$$

$$V_{cw} (\text{frente rápido aislamiento externo}) = 42.9 \text{ kV} + \frac{900 \text{ kV}}{1} * \frac{13.5 \text{ m}}{80 \text{ m} + 300000 \text{ m}} = 42.940 \text{ kV}$$

### 7.1.2 Determinación de las sobretensiones de soportabilidad requeridas

Las sobretensiones de soportabilidad requeridas se calculan mediante las siguientes expresiones:

Aislamiento interno

$$V_{rw} = V_{cw} * 1.15$$

Aislamiento externo

$$V_{rw} = V_{cw} * 1.05 * k_a$$

$k_a$  se determina de la siguiente expresión:

$$k_a = e^{m * \left(\frac{H}{8150}\right)}$$

Debido a que  $m=1$  para todas las sobretensiones consideradas  $K_a$  se puede calcular para todas las sobretensiones de la siguiente forma:

$$k_a = e^{\left(\frac{1495}{8150}\right)} = 1.2014$$

Con los datos anteriores se obtiene:

*Sobretensiones temporales de corta duración*

- *Fase - tierra*

Aislamiento interno  $V_{rp} = 9.53 \text{ kV} \times 1.15 = 10.959 \text{ kV}$

Aislamiento externo  $V_{rp} = 9.53 \text{ kV} \times 1.05 \times 1.2014 = 12.022 \text{ kV}$

*Sobretensiones de frente rápido*

Aislamiento interno  $V_{rw} = 42.943 \text{ kV} \times 1.15 = 49.384 \text{ kV}$

Aislamiento externo  $V_{rw} = 42.940 \text{ kV} \times 1.05 \times 1.2014 = 54.168 \text{ kV}$

### 7.1.3 Selección del nivel de aislamiento asignado

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

	Sobretensiones temporales		Sobretensiones por descargas eléctricas atmosféricas	
	Interno	Externo	Interno	Externo
Tensiones de soportabilidad requeridas	10.959	12.022	49.384	54.168
<b>Mínimas tensiones de soportabilidad requeridas</b>	<b>12.022</b>		<b>54.168</b>	

Los mínimos valores de soportabilidad requeridos son 12.020 kV para los impulsos de corta duración y 54.168 kV para impulso tipo rayo. Al revisar los valores normalizados que se presentaron en la Tabla 1 y la Tabla 2 se evidencia que los mínimos valores normalizados que satisfacen los requerimientos de aislamiento encontrados se definieron bajo el estándar IEC y se presenta a continuación:

<b>Vm</b>	<b>= 17.5 kV</b>
<b>Sobretensiones de corta duración a frecuencia industrial</b>	<b>= 38 kV</b>
<b>BIL</b>	<b>= 75 kV</b>

Es importante aclarar que cualquier valor normalizado superior al definido anteriormente es aceptable. Con los valores definidos anteriormente se especifican los equipos y materiales involucrados en la instalación aguas abajo del dispositivo de protección contra sobretensiones.

#### 7.1.4 Selección de aisladores

A continuación, se calculan las distancias de fuga y arco para los aisladores y la separación entre fases asociados a la estructura que soporta el transformador. Debido a que el sistema tiene neutro corrido con puesta a tierra múltiple, la distancia de fuga se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Distancia de fuga} = V_{Ln} * 1.1 * K_a * \Delta_{fuga}$$

De acuerdo con la Tabla 6, la distancia mínima de fuga para el nivel de contaminación muy ligera es 12.7 mm/kV.

$$\text{Distancia de fuga} = \frac{V_L * 1.1}{\sqrt{3}} * K_a * \Delta_{fuga} = \frac{13.2 * 1.1}{\sqrt{3}} * 1.2014 * 12.7 = 127.91 \text{ mm}$$

La distancia de fuga de los aisladores debe ser por lo menos de 127.91 mm.

Las distancias de arco (Fase a tierra) y entre fases son iguales para los sistemas en la gama I y se determinan con la Tabla 7. El aislamiento que se está especificando se encuentra aguas arriba de los DPS, por lo que no cuenta con protección contra sobretensiones y de acuerdo con lo especificado en la presente guía metodológica se debe trabajar con los valores de BIL de referencia dados en la Tabla 5. De esta forma se obtiene que para un BIL de 95 kV las distancias deben ser mínimo de 160 mm.

Los aisladores se deben especificar con los siguientes valores:

**Distancia de fuga mínima: 128 mm**

**Distancia de arco mínima: 160 mm**

La distancia entre fases se especifica con el siguiente valor:

**Distancia entre fases mínima: 160 mm**