



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA COORDINACIÓN DE  
AISLAMIENTO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, BASADA EN LA  
NORMATIVA IEC 60071-2 E IEEE C62.82.1

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: NAYELI NATHALI GRANDA ALULIMA  
BRANDON JOEL PAGUAY SARI

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

Cuenca - Ecuador  
2024

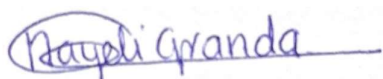
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Nayeli Nathali Granda Alulima con documento de identificación N° 1105874315 y Brandon Joel Paguay Sari con documento de identificación N° 0706696333; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 7 de mayo del 2024

Atentamente,



---

Nayeli Nathali Granda Alulima

1105874315



---

Brandon Joel Paguay Sari

0706696333

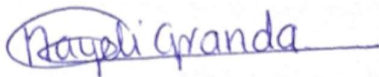
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Nayeli Nathali Granda Alulima con documento de identificación N° 1105874315 y Brandon Joel Paguay Sari con documento de identificación N° 0706696333, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Desarrollo de una guía para coordinación de aislamiento en sistemas de distribución, basada en la normativa IEC 60071-2 e IEEE C62.82.1”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 7 de mayo del 2024

Atentamente,



---

Nayeli Nathali Granda Alulima

1105874315



---

Brandon Joel Paguay Sari

0706696333

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, BASADA EN LA NORMATIVA IEC 60071-2 E IEEE C62.82.1, realizado por Nayeli Nathali Granda Alulima con documento de identificación N° 1105874315 y por Brandon Joel Paguay Sari con documento de identificación N° 0706696333, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 07 de mayo del 2024

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:  
**FLAVIO ALFREDO  
QUIZHPI PALOMEQUE**

---

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque

0102257482

## AGRADECIMIENTO

A Dios y a mi familia.

**Nayeli Nathali Granda Alulima**

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a Dios por haberme brindado la sabiduría y la guía necesarias para alcanzar mis metas y superar los desafíos que se presentaron en mi camino profesional. Así también deseo agradecer a mis padres por su incondicional apoyo, que me han recordado constantemente que soy capaz de lograr cualquier cosa que me proponga. Además, quiero expresar mi gratitud al Ingeniero Flavio Quizhpi, quien ha sido parte fundamental para el logro de esta tesis. Su paciencia, dedicación y orientación experta han sido invaluable durante todo el proceso.

**Brandon Joel Paguay Sari**

## **DEDICATORIA**

A mi familia.

**Nayeli Nathali Granda Alulima**

A mis padres y hermanos, gracias por creer en mí. A Dios, por su guía constante. A todos los que me acompañaron, ¡gracias por ser parte de este logro!

**Brandon Joel Paguay Sari**

## RESUMEN

La coordinación de aislamiento en sistemas de distribución es el proceso de seleccionar y coordinar diferentes niveles de protección adecuados para transformadores, bushing del transformador, descargadores, interruptor de potencia, disyuntores, barra del aislador en un sistema eléctrico y celdas de cargas, con el objetivo de garantizar un funcionamiento seguro y confiable. El estándar IEEE C62.82.1-2010 que determina definiciones, principios y reglas y el estándar IEEE Std C62.82.1-2022 es la guía de aplicación para la coordinación de aislamiento que proporcionan recomendaciones y directrices para la selección y coordinación de diferentes niveles de protección en un sistema eléctrico y actualmente las celdas de carga utilizadas en cabinas y redes subterráneas. La norma IEC 60071-2 ha desarrollado dos enfoques principales para realizar el estudio de coordinación de aislamiento: el estadístico y el determinístico. Siendo el procedimiento determinístico suficientemente preciso para estudios en sistemas de distribución de gama I. Se presenta un caso de estudio práctico y se compara los niveles de aislamiento y distancias eléctrica para un sistema de 22 kV basándose en los estándares de la IEEE y la IEC. De esta manera, la coordinación de aislamiento es una parte integral de la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de distribución, y ayuda a garantizar la seguridad en los sistemas eléctricos.

**Palabras clave:** Coordinación aislamiento, sistemas de distribución, sobrevoltajes, guía, gama I, estadístico, determinístico

## ABSTRACT

The coordination of isolation in distribution systems is the process of selecting and coordinating appropriate protection levels for transformers, transformer bushings, discharge devices, power interruptors, disconnectors, and isolator bars in an electrical system and cells of loads. This process aims to ensure safe and reliable operation. The IEEE C62.82.1-2010 standard that determines definitions, principles, and rules and the IEEE Std C62.82.1-2022 standard are guidelines for isolation coordination that provide recommendations and guidelines for the selection and coordination of different protection levels in an electrical system and currently the load cells used in cabinets and underground networks. The IEC 60071-2 standard has developed two main approaches for conducting isolation coordination studies: statistical and deterministic. The deterministic procedure is sufficiently precise for studies in distribution systems of gamma I. A practical case study example is presented and compared the isolation levels and electrical distances for a 22 kV system based on the IEEE and IEC standards. This way, isolation coordination is an integral part of system planning, design, construction, operation, and maintenance, and it helps ensure safety in electrical systems.

**Keywords:** Insulation coordination, distribution system, overvoltages, guide, range I, deterministic, statistical



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
<b>2. Normativas</b>	<b>5</b>
2.1. Norma IEC 60071-2	5
2.2. Norma IEEE C62.82.2-2010	8
<b>3. Procedimiento para la coordinación de aislamiento</b>	<b>11</b>
3.1. Procedimiento según IEEE C62.82.2 -2022	11
3.1.1. Etapa 1: Selección el descargador de sobrevoltaje	13
3.1.2. Etapa 2: Determinación de sobrevoltajes temporales o frecuencia industrial	18
3.1.3. Etapa 3: Determinación de sobrevoltajes tipo rayo	21
3.1.4. Etapa 4: Evaluar la coordinación de aislamiento	31
3.2. Procedimiento según IEC 60071-1	32
3.2.1. Etapa 1: Determinación de los sobrevoltajes representativos $U_{rp}$	33
3.2.2. Etapa 2: Voltajes soportadas de coordinación $U_{cw}$	38
3.2.3. Etapa 3: Voltajes soportados específicos $U_{rw}$	42
3.2.4. Etapa 4: Voltajes soportados normalizados $U_w$	44
<b>4. Validación del caso de estudio</b>	<b>46</b>
4.1. Aplicación del archivo excel para la IEC 60071-2	47
4.2. Aplicación del archivo excel según la IEEE C62.82.2-2022	53
4.3. Análisis de resultado	58
4.3.1. Análisis de resultados según el estándar IEEE C62.82.2-2022	58
4.3.2. Análisis de resultados según el estándar IEC 60071-2	60
4.3.3. Comparativa de resultados de las normativas aplicadas	61
4.4. Comparación entre normativas	62

<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>64</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	64
5.2. Recomendaciones . . . . .	67

## Índice de figuras

1.	Organigrama para determinar los niveles de aislamiento asignados y normalizados, según IEC 60071-2. [1]	6
2.	Procedimiento a seguir de la IEEE C62.82.1-2010 [1].	8
3.	Procedimiento a seguir de la IEEE C62.82.1-2010 [1].	9
4.	Resumen de procedimiento para la selección de descargadores y coordinación de aislamiento para la protección de transformadores según IEEE C62.22-2009 [2].	12
5.	Coefficiente de puesta a tierra para $R0/X1 = 0,5$ , según IEEE C62.22-2009 [2].	15
6.	Configuración del sistema contra sobrevoltajes con transformador.	22
7.	Configuración del sistema contra sobrevoltajes sin transformador.	22
8.	Características del descargador, según IEEE C62.82.2-2022 [3].	26
9.	Voltajes en el transformador, según IEEE C62.82.2-2022 [3].	27
10.	Curvas típicas de voltaje-tiempo para la coordinación de niveles de protección de descargadores con resistencia a la contaminación del aislamiento para transformadores sumergidos en líquido. [Switching Surges I-Phase-to-Ground Voltages AIEE Committee Report]. Figure 9 — Typical transformer and arrester volt-time curves for coordination of arrester protective levels with insulation withstand strength for liquid-filled transformers [4].	31
11.	Relación entre $\frac{R_0}{X_1}$ y $\frac{X_0}{X_1}$ para los valores constantes del factor de falla a tierra k. [5]	34
12.	Rango de sobrevoltajes de frente lento al 2% en el extremo de recepción debido la conexión y reenganche de la línea según IEC60071-2. [5]	35
13.	Rango entre los valores 2% de sobrevoltajes de frente lento entre fases y fase-tierra según IEC60071-2. [5]	36
14.	Diagrama de la conexión del pararrayos al objeto protegido según IEC 60071-2 [5].	41

15.	Relación entre el exponente $m$ y la tensión soportada de coordinación a impulso tipo maniobra según IEC60071-2. [Figura 9 – Relación entre el exponente $m$ y la voltaje soportada coordinación a impulsos tipo maniobra.] [5]. . . . .	43
16.	Celda MT seccionador - fusible SM6 QM 24kV Contactos, manual, 630 A, 20 kA. Fuente autoría propia. Ficha técnica en el siguiente url: <a href="https://www.se.com/co/es/product/SM61Q3JHH6Z7CONTA/celda-mt-seccionador-fusible-sm6-qm-24kv-contactos-manual">https://www.se.com/co/es/product/SM61Q3JHH6Z7CONTA/celda-mt-seccionador-fusible-sm6-qm-24kv-contactos-manual</a>	
17.	Parámetros del sistema. . . . .	47
18.	Datos del alimentador 0422. . . . .	47
19.	Impedancias de secuencia positiva y cero. . . . .	48
20.	Datos de sobrevoltajes temporales falla a tierra y por pérdida de carga. . . . .	48
21.	Valores de $U_{e2}$ y $U_{p2}$ . . . . .	49
22.	Voltaje de truncamiento fase-tierra y fase-fase. . . . .	49
23.	Sobrevoltajes de coordinación temporales y de maniobra. . . . .	50
24.	Sobrevoltajes de coordinación de frente rápido externo y interno. . . . .	51
25.	Voltajes soportados específicos a las sobrevoltajes temporales, tipo maniobra y tipo rayo. . . . .	52
26.	Parámetros iniciales del sistema. . . . .	53
27.	Resultado de cortocircuito a nivel de medio voltaje. . . . .	53
28.	Valores para el cálculo de la impedancia. . . . .	54
29.	Cálculo del valor $K_e$ . . . . .	54
30.	Determinación del $U_r$ . . . . .	54
31.	Características del descargador. . . . .	55
32.	Determinación del TOV. . . . .	55
33.	Determinación de la longitud de fuga. . . . .	55
34.	Datos requeridos para sobrevoltaje por impulso tipo rayo. . . . .	56
35.	Determinación del voltaje $E(p - p)$ y $E(p - e)$ . . . . .	56
36.	Determinación de la pendiente de sobrevoltaje por impulso tipo rayo. . . . .	56
37.	Determinación del voltaje para el transformador. . . . .	57
38.	Evaluación de la coordinación de aislamiento. . . . .	57

## Índice de tablas

1.	Niveles de aislamiento normalizados para la gama I ( $1 \text{ kV} < V_m \leq 245 \text{ kV}$ ) . . . . .	7
2.	Voltajes estándares para sistemas tipo I ( $15 \text{ kV} \leq V_m \leq 242 \text{ kV}$ ) . . . . .	10
3.	Corrientes de sobreimpulso de descargadores de distribución y requisitos de rendimiento mínimos de energía de carga y térmica. . . . .	17
4.	Corrientes de clasificación según sobrevoltajes tipo rayo (IEEE Std C62.11-2020) . . . . .	17
5.	Valores representativos del factor de defecto a tierra . . . . .	19
6.	Grado de contaminación de la gravedad del sitio en el aislador. . . . .	20
7.	Comparación de los requisitos de contaminación, IEEE frente a CIGRE, específicos de distancia de fuga para I-string. . . . .	20
8.	Valores sugeridos del efecto corona. . . . .	23
9.	Constante A y B . . . . .	28
10.	Valores a obtener de frente lento fase-tierra . . . . .	36
11.	Valores a obtener de frente lento fase-fase . . . . .	37
12.	Factor A para diferentes tipos de líneas aéreas . . . . .	41
13.	Factores de conversión de ensayo para la gama I para convertir los voltajes soportados a impulso tipo maniobra especificadas en voltajes soportados a impulso tipo rayo y a frecuencia industrial de corta duración . . . . .	45
14.	Resultados del nivel de aislamiento para los componentes del sistema. . . . .	59
15.	Resultados del nivel de aislamiento de voltajes del sistema. . . . .	59
16.	Voltajes soportados específicos mínimos . . . . .	60
17.	Voltajes soportados normalizados. . . . .	61
18.	Voltajes normalizados IEC 60071-2 y IEEE C62.82.2-2022. . . . .	61
19.	Procedimiento y características entre la norma IEEE C62.82.2-2022 y IEC 60071-2. . . . .	62
20.	Descripción de los factores empleados entre la norma IEEE C62.82.2-2022 y IEC 60071-2. . . . .	63

## Glosario

IEC International Electrotechnical Commission.

**IEEE** The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**SEP** Sistema eléctrico de potencia.

## 1. Introducción

El estudio de sobrevoltaje son esenciales porque permiten establecer el nivel de aislamiento para los distintos componentes de un sistema. La selección de los elementos del sistema se realiza conociendo el comportamiento de los distintos aislamiento frente a todo tipo de sobrevoltajes [6].

La seguridad del personal público y de servicio público es un aspecto fundamental en la coordinación de aislamiento en sistemas eléctricos. Cuando se diseña y se opera un sistema eléctrico, es importante garantizar que las instalaciones y equipos estén configurados de manera segura para proteger tanto a los trabajadores como al público en general.

Asegurar que la corriente fluya solo a lo largo de los conductores es un principio clave, este principio se refiere a garantizar que la corriente eléctrica siga el camino deseado a lo largo de los conductores eléctricos y no se desvíe hacia otras partes del sistema, lo que podría causar fallas o riesgos para la seguridad.

Para prevenir daños en el equipo debido a voltajes altos, especialmente, prevenir o reducir los daños permanentes en transformadores y cables, es una preocupación fundamental en la coordinación del aislamiento en sistemas eléctricos. Es por eso que realizar la coordinación del aislamiento se refiere a garantizar que los diferentes componentes del sistema eléctrico, como transformadores, cables y equipos de conmutación, estén diseñados y operados de manera compatible para evitar sobrevoltajes y fallas. Esto se logra mediante

la implementación de un diseño de sistema adecuado y la selección de dispositivos de protección, como descargadores de sobrevoltaje y fusibles, para limitar la propagación del sobrevoltaje y proteger el equipo de daños.

El estándar IEEE C62.82.2-2022, para equipos con clase 1 (1-242 kV) incluye, el voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial (fase-fase), el voltaje soportado normalizado a los impulso tipo rayo (fase-fase) que permite determinar los voltajes normalizados a los equipos. Mientras que el estándar IEC 60071-1, para equipos con clase 1 (1-245 kV) para sistemas de distribución y subtransmisión normalmente diseñados y operados, están expuestos a fallas, contacto o caídas de objetos sobre las líneas y/o descargas. El diseño o selección inadecuada del aislamiento genera un elevado costo económico de compra y puede llegar a ocasionar desconexiones en el sistema, daños en equipos y pérdida de vida útil de equipos electrónicos. Se define como la selección de la robustez dieléctrica de los equipos en relación al voltaje de operación y sobrevoltajes que pueden aparecer en el sistema donde será instalado el equipo, tomando en cuenta las condiciones ambientales y los equipos de mitigación de sobrevoltajes utilizadas. Para la norma IEC 60071-1, relaciona la operación de voltajes y sobrevoltajes, tomando en cuenta la altitud. Según la norma IEEE C62.82.2-2022 habla de los elementos de protección disponible en sobrevoltajes.

## **1.1. Justificación**

Garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia de las redes eléctricas es crucial al minimizar los riesgos asociados a fallas y fenómenos transitorios. La normativa IEC 60071-2 brinda una estructura coherente en la coordinación



de aislamiento que facilita la interoperabilidad y la compatibilidad entre diferentes sistemas y equipos. En contraste, la normativa IEEE C62.82.1 aborda los sobrevoltajes transitorios en sistemas de energía eléctrica, ocasionadas por eventos como descargas atmosféricas y maniobras de conmutación, que pueden dañar el aislamiento y los equipos. Esta normativa permite evaluar y reducir los riesgos de fallos y averías relacionados con estas sobrevoltajes. La confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico son fundamentales para evitar interrupciones en el suministro eléctrico y reducir los tiempos de inactividad. Esto conlleva una mayor disponibilidad de energía eléctrica y mejora la calidad del servicio, lo que beneficia tanto a los usuarios finales como a los operadores del sistema. La interacción adecuada entre los componentes del sistema, como transformadores, interruptores, aisladores y cables, es esencial para prevenir fallas que suelen resultar en daños a equipos, interrupciones en el suministro de energía o incluso accidentes graves. A medida que las redes eléctricas evolucionan con la incorporación creciente de energías alternativas y la expansión de la electrificación en diversos sectores, surgen nuevos desafíos únicos en términos de coordinación de aislamiento. Estos desafíos incluyen la integración de generadores distribuidos y la variabilidad de la carga, lo que demanda una evaluación exhaustiva de las normativas existentes. En el Ecuador, no existe un proceso propio de homologación vigente que garantice la coordinación de aislamiento para la seguridad y confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia ([SEP](#)), por lo cual esté se rige a las normativas antes mencionadas, por lo cual la guía para coordinación de aislamiento en los sistemas de distribución, está basada en los criterios y procedimientos de las normas IEC 60071-2 e IEEE C62.82-2022.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Elaborar un guía que aborde la coordinación del aislamiento en sistemas de distribución, tomando como base las pautas establecidas en las normativas IEC 60071-2 e IEEE C62.82.1.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Obtener información acerca de la coordinación de aislamiento y llevar a cabo una comparación entre las regulaciones IEC 60071-1 e IEEE C62.82.1 para identificar sus semejanzas y diferencias.
- Elaborar una guía para coordinación de aislamiento para los sistemas de distribución.
- Validar la guía mediante el desarrollo de un caso de estudio.

## 2. Normativas

La normativas IEC 60071-1 elaborada por el comité técnico 28 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC,2018) [7], IEEE C62.82.1-2010 (IEEE,2010) [1] e IEEE C62.82.2-2022 (IEEE,2022) [3] el desarrollado por el comité Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos y son los pilares fundamentales para la coordinación de aislamiento, el cual contiene orientaciones de aplicación que tratan de la selección de los niveles de aislamiento en los sistema eléctricos de potencia.

### 2.1. Norma IEC 60071-2

La normativa brinda un procedimiento de 4 etapas el cual consiste en elegir un conjunto normalizado de voltajes soportados que caracteriza el aislamiento del material que entra en el campo de la aplicación de esta norma [7], de esta manera obtener margenes de protección aceptable. En la Fig.1 se detalla un organigrama que presenta el procedimiento a cumplir para la coordinación de aislamiento.

En la tabla 1 de la normativa IEC 60071-2 brinda valores referenciales de aislamiento según el nivel máximo de voltaje del sistema.

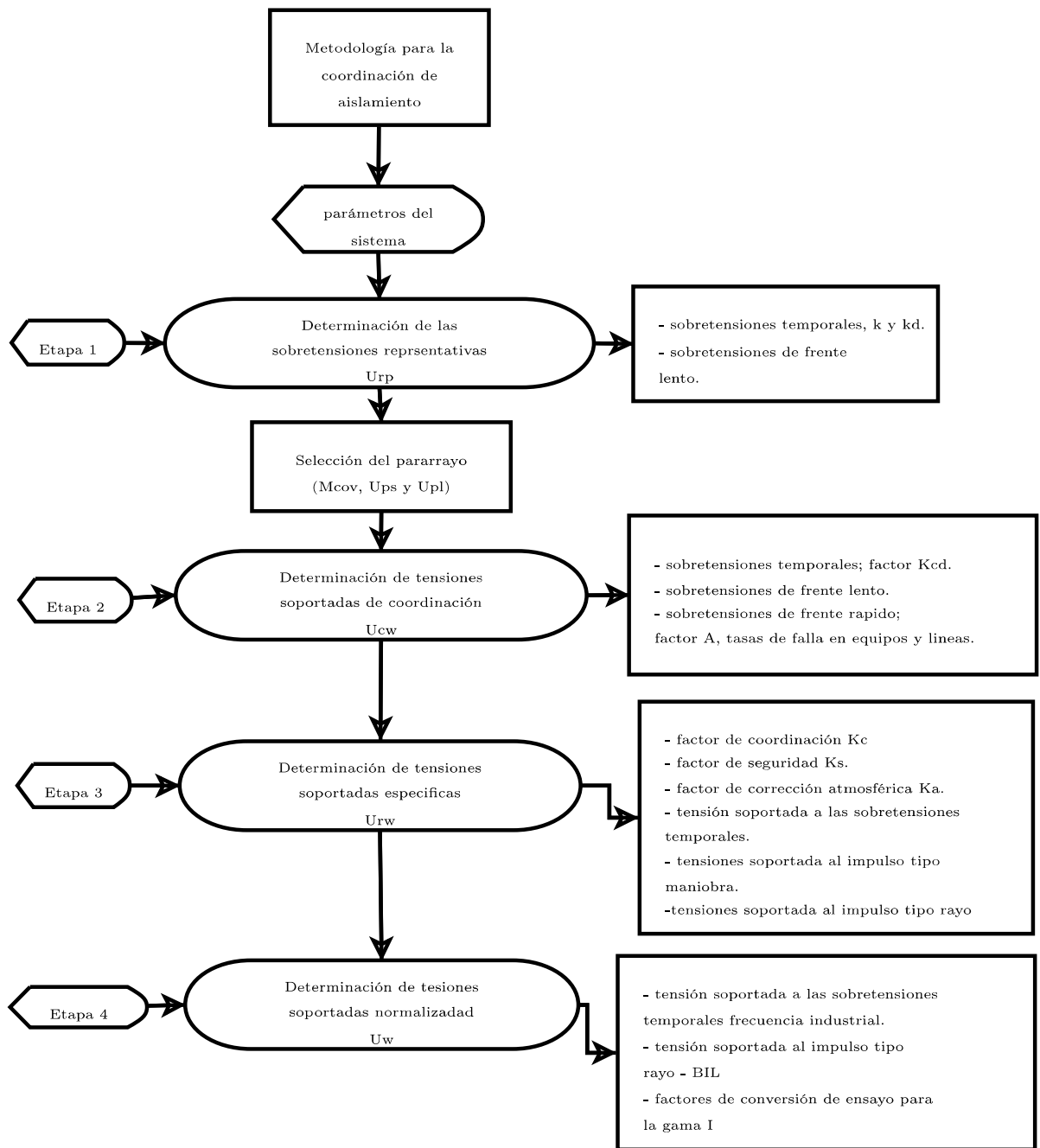


Figura 1: Organigrama para determinar los niveles de aislamiento asignados y normalizados, según IEC 60071-2. [1]

Tabla 1: Niveles de aislamiento normalizados para la gama I ( $1 \text{ kV} < V_m \leq 245 \text{ kV}$ )

Voltaje más elevado para el material $U_m$ (valor eficaz) kV	Voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial (valor eficaz) kV	Voltaje soportado normalizado a los impulsos tipo rayo (valor de cresta) kV
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 los voltajes soportados especificados entre fases se cumplen, se requieren ensayos complementarios de voltajes soportados entre fases.*<sup>7</sup>

*Fuente: Los datos son proporcionados según la IEC 60071-2 (IEC coordinación de aislamiento parte 2: guía de aplicación) [5].*

## 2.2. Norma IEEE C62.82.2-2010

La norma brinda recomendaciones y directrices en la coordinación de aislamiento, un proceso de selección y aplicación de diferentes niveles de aislamiento en un sistema de potencia de distribución o transmisión, con el objetivo de lograr un funcionamiento fiable y seguro del sistema. En las figuras 2 y 3 se detallan las directrices y recomendaciones del estándar IEEE C62.82.2-2010:

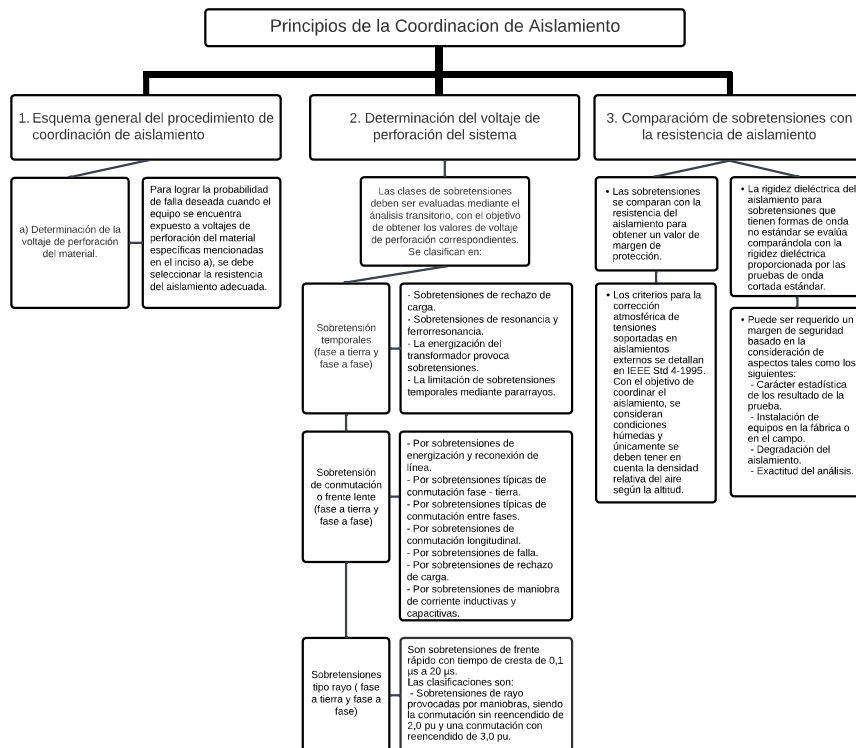


Figura 2: Procedimiento a seguir de la IEEE C62.82.1-2010 [1].

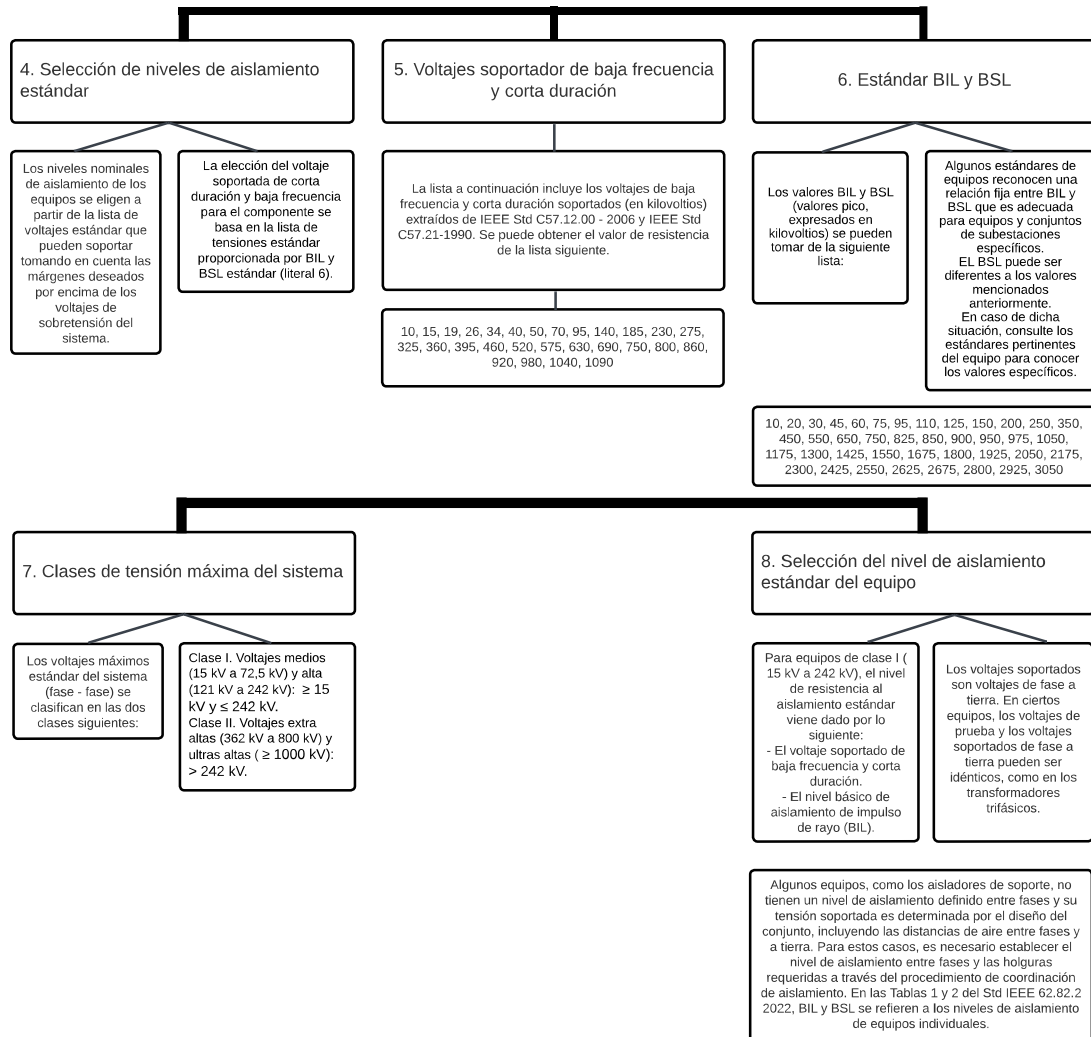


Figura 3: Procedimiento a seguir de la IEEE C62.82.1-2010 [1].

En la tabla 2 de la norma IEEE C62.62.1 - 2010 se brinda valores referenciales de aislamiento según el nivel máximo de voltaje del sistema.

Tabla 2: Voltajes estándares para sistemas tipo I ( $(15 \text{ kV} \leq V_m \leq 242 \text{ kV})$ )

Máximo voltaje del sistema (fase - fase) kV, rms	Nivel de aislamiento de impulso tipo rayo BIL kV, cresta	Voltajes soportados de baja frecuencia y corta duración (fase - tierra) kV, rms
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

*Fuente: Los datos son proporcionados según la IEEE Std C62.82.1 -2010 (Estándar IEEE para Coordinación de Aislamiento - Definiciones, Principios y Reglas.) [IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules]: Table 1 —Standard withstand voltages for Class I ( $15 \text{ kV} \leq V_m \leq 242 \text{ kV}$ )[1].*



### 3. Procedimiento para la coordinación de aislamiento

La coordinación de aislamiento determina los niveles de voltajes adecuados a soportar de los diferentes equipos que soporta un sistema eléctrico de potencia (*SEP*), teniendo en cuenta los parámetros iniciales del sistema y la rigidez dieléctrica del equipo. El objetivo principal de la coordinación del aislamiento es proteger el sistema contra fallas de aislamiento debido a altos voltajes considerando factores prácticos y económicos; y mantener la continuidad de la operación del sistema[8], por lo cual se detalla los procedimientos tanto de la normativas IEC 60071-2 y la IEEE C62.82.2-2022.

#### 3.1. Procedimiento según IEEE C62.82.2 -2022

Se identifica los valores de voltaje máximos del equipo y el tipo de sistema (sólidamente puesto a tierra o neutro flotante). Para un sistema de distribución del servicio al cual estará sometido el equipo. Al ser de gama I, se realiza el calculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial y tipo rayo.

Una vez identificada, el procedimiento para la protección de las estaciones se resumen en los siguientes pasos según IEEE C62.22-2009 (Guía IEEE para la Aplicación de Descargadores de Sobrevoltaje de Óxido Metálico en Sistemas de Corriente Alterna.) [IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems]: Figure 5—Summary of

procedures for arresters selection and insulation coordination for transformer protection [2].

En la Figura 4, se muestra los pasos a seguir según la IEEE C62.22-2009:

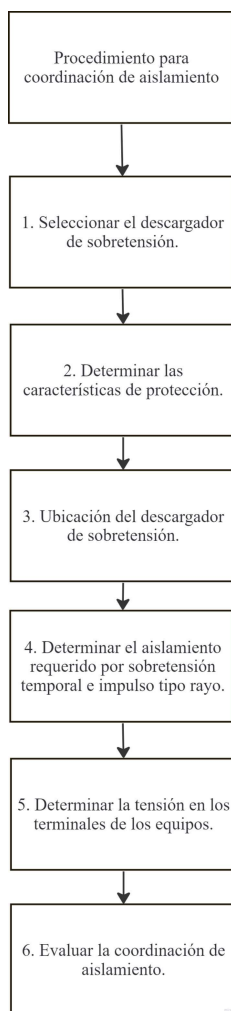


Figura 4: Resumen de procedimiento para la selección de descargadores y coordinación de aislamiento para la protección de transformadores según IEEE C62.22-2009 [2].

### 3.1.1. Etapa 1: Selección el descargador de sobrevoltaje

#### 3.1.1.1 Voltaje de operación continua MCOV

El voltaje eficaz máximo de corriente alterna diseñado que puede ser aplicado continuamente entre los terminales de los descargadores [2]. Para el cálculo del MOV, se utiliza la ecuación (1).

$$MCOV = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Donde:

$U_m$  : Voltaje máxima (fase-fase) [kV].

#### 3.1.1.2 Sobrevoltajes Temporales TOV

Se caracteriza por su amplitud, su forma de onda y su duración. Su amplitud se define por un valor (el máximo previsto), un conjunto de valores de cresta, o una distribución estadística de valores cresta. Para el calculo del TOV (fase-fase) se escoge el valor máximo, se utiliza la ecuación (2).

$$TOV(fase - fase) = k_e \times COV \quad (2)$$

Donde:

- $k_e$ : constante a tierra.
- COV: voltaje máximo fase a fase del sistema.

Existen dos métodos para calcular la coeficiente de puesta a tierra  $k_e$ . Para sistemas sólidamente puestos a tierra tiene un valor de 1,3 p.u. de acuerdo

a la IEEE C62.82.2-2022 (Guía IEEE para la Aplicación de Coordinación de Aislamiento.) [IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination] [3]. Para el calculo el COV, se utiliza la ecuación (3):

$$COV = 1,05 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

La normativa IEEE C62.22-2009 (Guía IEEE para la Aplicación de Descargadores de Sobrevoltaje de Óxido Metálico en Sistemas de Corriente Alterna.) [IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems] anexo B proporciona una guía para la determinación del factor k. A partir de los valores conocidos de  $R0/X1$  y  $X0/X1$  en el lugar de la falla, puede determinarse el coeficiente de puesta a tierra interpolando entre las curvas según sea necesario. Por ejemplo, para el caso de estudio donde  $R1/X1 = 0,377$ , se escoge en la figura 5. y se obtiene un valor de 63,5% [2].

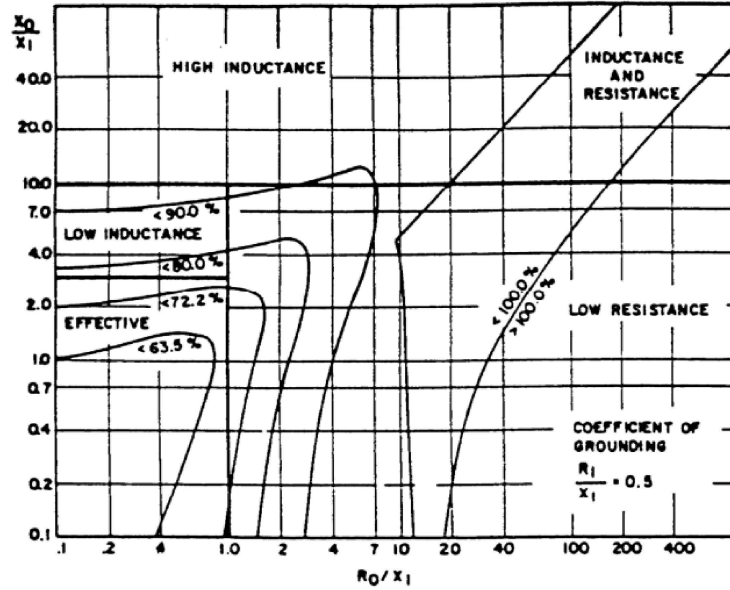


Figura 5: Coeficiente de puesta a tierra para  $R_0/X_1 = 0,5$ , según IEEE C62.22-2009 [2].

### 3.1.1.3 Voltaje nominal del descargador $U_r$

Para calcular el voltaje nominal del descargador de sobrevoltajes (R), se escoge el mayor valor entre  $R_o$  y  $R_e$ . De esta manera, las ecuaciones son:

$$R_o = \frac{COV}{k_o} \quad (4)$$

$$R_e = \frac{TOV}{k_t} \quad (5)$$

Donde:

$k_o$  : Factor de diseño normalizado del descargador de sobrevoltajes igual a 0,8 (Se toma este valor que puede variar según el fabricante).

$k_t$  : Capacidad del descargador de sobrevoltajes que depende del tiempo de

duración del sobrevoltaje temporal.

Se selecciona el voltaje máximo entre  $R_o$  y  $R_e$  y la voltaje nominal del descargador es  $U_r[kV]$ . Los valores de las constantes son:

$k_t$  : 1,15 por un 1 segundo, cuando el sistema tiene puesta a tierra.

$k_t$  : 1,06 para 10 segundos, cuando el sistema tiene una impedancia como puesta a tierra.

$k_t$  : 0,95 para 2 horas, cuando en el sistema de puesta a tierra el neutro no esta puesto a tierra

#### **3.1.1.4 Corrientes de coordinación**

Los voltajes máximos de descarga son el resultado de las pruebas a la cuales son sometidos los descargadores, estos voltajes son medidos a un tiempo de  $0,5 \mu s$  y  $8/20 \mu s$  para sistemas tipo I, el estudio se limita a corrientes de 5 y 10 [kA]. En las tablas 3 y 4 se detalla la corriente para distribución en condiciones de sobrecarga y normales.

Tabla 3: Corrientes de sobreimpulso de descargadores de distribución y requisitos de rendimiento mínimos de energía de carga y térmica.

Clase de distribución del descargador	Clasificación de corriente tipo rayo $I_{class}$ (kA)	Sobreimpulso de corriente (kA)	Clasificación mínima de transferencia de carga de impacto único $Q_{rs}$ (C)	Clasificación mínima de energía térmica $Q_{th}$
Alta Rendimiento ( Heavy Duty, HD)	10	100	0,4	1,1
Normal Rendimiento (Normal Duty, ND)	5	65	0,2	0,7
Ligero Rendimiento (Light Duty, LD)	5	40	0,1	0,45

*Fuente: Los datos son proporcionados según la IEEE Std C62.11-2020 (Estándar IEEE para descargadores de sobrevoltajes de óxido metálico para circuitos en AC de más de 1 kV.) [IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV): Table C.2—Distribution arrester impulse currents and minimum charge and thermal energy performance requirements. [?]]*

Tabla 4: Corrientes de clasificación según sobrevoltajes tipo rayo (IEEE Std C62.11-2020)

Tipos de descargadores	Voltaje máximo del sistema (kV)	Corriente de descarga (kA)
Distribución normal & ligero rendimiento	Todos los sistemas de voltaje	5
		10
Alto rendimiento Intermedio Estación	Menos de 170 Menos de 550 550 800-1200	5
		10
		15
		20

*Fuente: Los datos son proporcionados según la IEEE Std C62.82.2-2022 (Guía IEEE para la Aplicación de Coordinación de Aislamiento.) [IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination]: Table 2—Lightning impulse classifying currents. [3]]*

### 3.1.1.5 Niveles de protección

Los niveles de protección se determinan por los voltajes de descarga del descargador en consideración. Se deben considerar los siguientes niveles de protección:

1. FOW: El valor más alto de voltaje del descargador de FOW o voltaje de descarga de descargador en el pico de  $0,5\mu s$  en la corriente. [2]
2. LPL: El valor más alto de voltaje para un impulso de rayo 1.2/50 o voltaje del descargador que resulta de una onda de corriente 8/20. [2]
3. SPL: El valor más alto de voltaje de pico por impulso de maniobra o voltaje de descarga de descargador que resulta de una serie de ciclos de corriente con un tiempo de cresta real de  $45\mu s$  a  $60\mu s$ . [2]

### 3.1.2. Etapa 2: Determinación de sobrevoltajes temporales o frecuencia industrial

#### 3.1.2.1 Cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial

Para determinar el TOV, se necesita conocer el factor de falla a tierra  $K_e$  que según IEEE C62.82.2-2022 tiene un valor de 1,30 y para determinar el factor por rechazo de carga se utiliza la tabla 5. Por lo tanto, se utiliza las siguientes ecuaciones (6), (7) y (8).

$$TOV(p - e) = K \times \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$TOV(p - e) = K_d \times \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

$$TOV(p - p) = K_d \times U_m \quad (8)$$

Para seleccionar el sobrevoltaje resultante TOV (fase-tierra), se selecciona el máximo entre ellos.



Tabla 5: Valores representativos del factor de defecto a tierra

Conexión del neutro	k
Neutro rígido a tierra	1,4
Neutro no rígido a tierra	1,7
Neutro aislado	1,9

*Fuente: Se obtiene de [6]*

### 3.1.2.2 Enfoque de diseño

La contaminación disminuye el voltaje de perforación del aislador. La regla de diseño determinista consiste en igualar el voltaje de resistencia estadístico ( $V_3$ ) al voltaje máximo entre fase y tierra ( $E_m$ ). Siendo el voltaje máximo igual al TOV.

$$V_3 = E_m \quad (9)$$

donde:

$$V_3 = CFO \left[ 1 - 3 \frac{\sigma_f}{CFO} \right] \quad (10)$$

Donde:

$E_m$  : Es el voltaje máximo (fase-tierra).

$V_3$  : Es el voltaje máximo del sistema.

El CFO es el voltaje de flameo crítico y el coeficiente de variación fijado por la desviación estándar del comportamiento estadístico,  $\sigma_f/CFO$  se asume un valor de 10 %. Para el caso de subestaciones se toma un valor de 7 % [3].

### 3.1.2.3 Nivel de contaminación

Se selecciona el nivel de contaminación de acuerdo al lugar geográfico, en la cual se encuentra el sistema. Por ejemplo, para el caso de estudio se considera un lugar moderado al ubicado en el centro de la ciudad. En la tabla 6 con un valor de  $0,06 - 0,10[mg/cm^2]$ , mientras que en la tabla 7 con un valor de  $34 mm/kV$ .

Tabla 6: Grado de contaminación de la gravedad del sitio en el aislador.

Grado de gravedad del sitio	CIGRE TB 63 (mg/cm <sup>2</sup> ) [B1]	IEEE (mg/cm <sup>2</sup> ) [B19]	IEC 60815 (mg/cm <sup>2</sup> ) [B16]
Muy ligera	0.015-0.03	0-0.03	0-0.01
Ligero	0.03-0.06	0.03-0.06	0.01-0.04
Moderado	0.06-0.12	0.06-0.10	0.04-0.18
Pesado	0.12-0.24	>0.10	0.18-0.7

*Fuente: Los datos son proporcionados según la IEEE C62.82.2-2022 (Guía IEEE para la Aplicación de Coordinación de Aislamiento.) [IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination]: Table 4—Contamination site severity [3].*

Tabla 7: Comparación de los requisitos de contaminación, IEEE frente a CIGRE, específicos de distancia de fuga para I-string.

ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )	CIGRE (línea a tierra)			IEEE (mm/in/kV)
	Neblina salina (mm/in)	Diatomeas (mm/in)	Resistencia al niebla salina (mm/in)	Niebla limpia (mm/in)
0.03	32/1.30	22/0.87	30/1.18	23/0.91
0.06	38/1.49	29/1.14	36/1.42	30/1.18
0.10	42/1.65	35/1.37	41/1.61	34/1.34
0.40	58/2.28	60/2.36	57/2.24	41/1.61

*Fuente: Los datos son tomados de la IEEE C62.82.2-2022 (Guía IEEE para la Aplicación de Coordinación de Aislamiento.) [IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination]: Table 10—Comparison of contamination requirements, IEEE versus CIGRE specific leakage distance for I-strings [3].*

#### 3.1.2.4 Longitud de fuga

La longitud de fuga influye en la capacidad del aislamiento que tiene el aislador para soportar voltajes elevados sin fallas. Por ejemplo, para un sitio moderado se toma un valor de  $34 \text{ mm/kV}$ . Para calcular la longitud de fuga, se utiliza la ecuación (11).

$$\text{Linea de Fuga (mm)} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \times L_e \quad (11)$$

Donde:

$U_m$  : Voltaje más elevada de la red (fase-fase) [kV].

$L_e$  : Nivel de contaminación [mm/kV].

#### 3.1.3. Etapa 3: Determinación de sobrevoltajes tipo rayo

##### 3.1.3.1 Ejemplo de aplicación para sobrevoltajes tipo rayo

El método simplificado es útil para aproximar los niveles de protección o BIL necesarios en subestaciones de tamaño reducido o de baja complejidad. Además, puede ser útil para obtener estimaciones preliminares de estaciones más grandes y complejas antes de realizar un análisis detallado. La figura 6 se presenta una configuración típica con transformador y en la figura 7 con una configuración típica sin transformador.

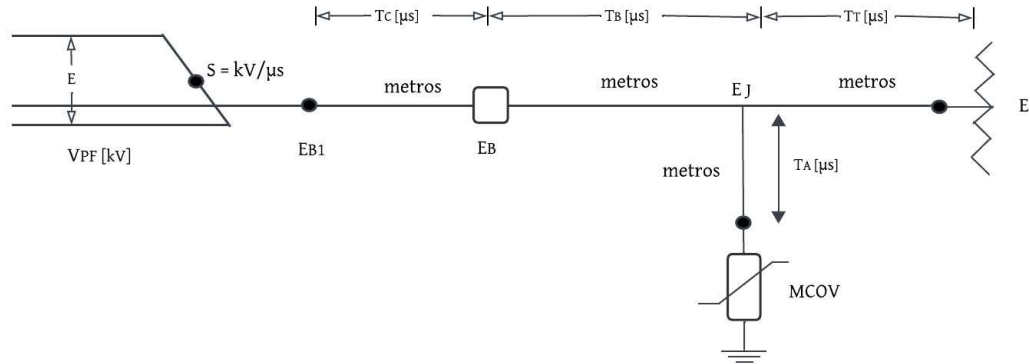


Figura 6: Configuración del sistema contra sobrevoltajes con transformador.

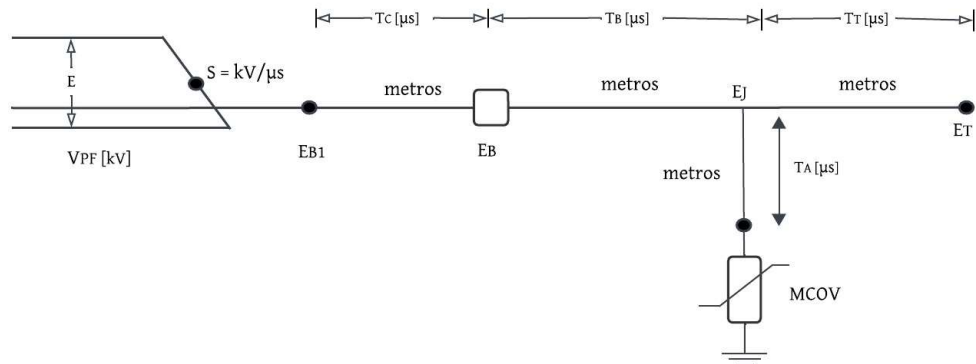


Figura 7: Configuración del sistema contra sobrevoltajes sin transformador.

### 3.1.3.2 Cálculo del CFO para sobrevoltajes tipo rayo

El gradiente de CFO para un impulso de rayo positivo es aproximadamente  $560 \text{ kV/m}$  para aire, porcelana o fibra de vidrio. [3]

- a. El sobrevoltaje entrante: Para el cálculo de la distancia de la descarga

Tabla 8: Valores sugeridos del efecto corona.

Conductor	Ks (kV - km / $\mu$ s)
Conductor individual	700
Paquete de dos conductores	1000
Paquete de 3 o 4 conductores	1700
Paquete de 6 o 8 conductores	2500

*Fuente: Los datos obtenidos son la IEEE C62.82.2-2022 (Guía IEEE para la Aplicación de Coordinación de Aislamiento.) [IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination]: Table 20—Suggested value of the corona constant [3].*

eléctrica, se utiliza la ecuación (12).

$$d = \frac{1}{n(MTBF)(BFR)} \quad (12)$$

Donde:

$d$  : es la distancia hasta el flashover (km).

$n$  : es el número de líneas.

$MTBF$  : es el tiempo medio entre fallas en años.

$BFR$  : es la tasa de descarga por 100 km-año.

Para determinar los voltajes en el transformador y en el equipo conectado al bus del transformador, emplee "n", que representa el total de líneas que convergen en la estación, incluyendo aquella que recibe la sobrecarga. Para otros equipos, considere  $n = 1$ , sin importar la cantidad de líneas. Extienda el valor de "d" hasta la torre más alejada y, con este nuevo valor de "d", estime la pendiente frontal "S" usando la ecuación proporcionada. De acuerdo a la tabla 8, se obtiene el dato del valor del efecto corona y se utiliza la ecuación (13).

$$S = \frac{K_s}{d} \quad (13)$$

Se muestra una serie de variables y definiciones que se utilizan para el caso de estudio.

- $E$  representa el voltaje pico de la sobrecarga entrante, considerado como 1,2 veces la CFO (Cresta de Frecuencia de Operación) positiva por impacto de rayo en el aislamiento de la línea (medido en kV).
- $S$  : denota la pendiente de la parte frontal de la sobrecarga (expresado en kV por microsegundo).
- $E_T$  : corresponde al voltaje pico de sobrecarga en el transformador (kV).
- $E_t$  : indica el voltaje total de sobrecarga a tierra en el transformador (medido en kV).
- $E_d$  : representa el voltaje de descarga del descargador (kV; obtenido de los datos del catálogo).
- $E_A$  : se refiere al voltaje de descarga del descargador más el voltaje de  $V_{PF}$ (kV).
- $E_J$  : es el voltaje de cresta de la sobrecarga en la unión descargador-bus (kV).
- $E_j$  : indica el voltaje total de sobrecarga a tierra en la unión descargador-bus (medido en kV).
- $E_B$  : representa el voltaje de cresta de la sobrecarga en el interruptor (kV).

- $E_b$  : se refiere al voltaje total de sobrecarga a tierra en el interruptor (kV).
- $E_C$  : indica el voltaje de cresta de la sobrecarga en un extremo abierto (kV).
- $E_c$  : denota el voltaje total de sobrecarga a tierra en un extremo abierto (medido en kV).
- $T_C$  : corresponde al tiempo de viaje entre la unión descargador-bus y el extremo abierto de la línea (medido en microsegundos).
- $T_A$  indica el tiempo de viaje entre el descargador y la unión descargador-bus ( $\mu s$ ).
- $T_B$  representa el tiempo de viaje entre la unión descargador-bus y el interruptor ( $\mu s$ ).
- $T_T$  :se refiere al tiempo de viaje entre la unión descargador-bus y el transformador ( $\mu s$ ).
- $V_{PF}$  : corresponde al voltaje de frecuencia de potencia, medido en kilovoltios, con polaridad opuesta a la sobrecarga, equivalente al 83 % del voltaje de cresta de frecuencia de potencia línea-neutro. Este valor promedio conservador asegura voltajes de sobrecarga uniformes en todas los aislamientos de fase. Valores menos conservadores son el 72 % para la configuración horizontal de fase y el 40 % para la configuración vertical de fase.
- $R_A$  : representa la resistencia aparente del descargador ( $\Omega$ ), que es la resistencia entre cualquier par de puntos en la característica

voltaje-corriente alrededor del valor estimado de corriente de descarga. Se utiliza la ecuación (14) para el cálculo.

$$R_A = \frac{E_{A1} - E_{A2}}{I_{A2} - I_{A1}} \quad (14)$$

- "n" : denota el número total de líneas, incluyendo la línea que recibe la sobrecarga.
- $E_0$  : es el voltaje inicial para el modelo de forma lineal de la característica voltaje - corriente del descargador (kV).

El voltaje de descarga del descargador está representado en la figura 8 y se define según la ecuación o se selecciona para el voltaje de descarga de  $0,5 \mu s$ .

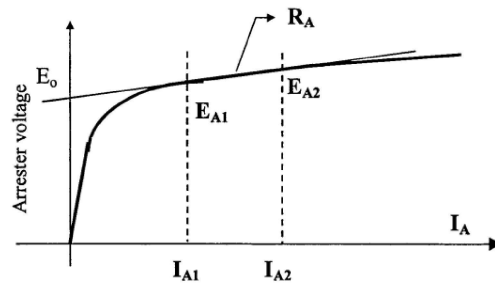


Figura 8: Características del descargador, según IEEE C62.82.2-2022 [3].



Se muestra la relación de los voltajes:

$$E_A = E_d + V_{PF} \quad (15)$$

$$E_j = E_J + V_{PF} \quad (16)$$

$$E_t = E_t + V_{PF} \quad (17)$$

$$E_B = E_b + V_{PF} \quad (18)$$

$$E_C = E_c + V_{PF} \quad (19)$$

En la figura 9 se muestra los voltajes en el transformador.

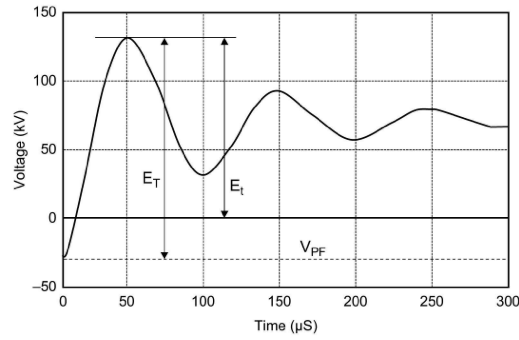


Figura 9: Voltajes en el transformador, según IEEE C62.82.2-2022 [3].

b. Voltaje del transformador:

Se calcula la corriente del descargador  $I_A$ , con la ecuación (20).

$$I_A = 1,6 \frac{\frac{2E}{n} - E_o - V_{PF}}{\frac{Z}{n} + R_A} \quad (20)$$

Donde:

$Z$  : es la impedancia del bus ( $\Omega$ ).

$n$  : es el número de línea.

Tabla 9: Constante A y B

Número de líneas	A	B
1	1	0,14
2	0,98	0,16
3	0,84	0,18
4	0,68	0,25

*Fuente: Los datos proporcionados son de la IEEE C62.82.2-2022 (Guía IEEE para la Aplicación de Coordinación de Aislamiento.) [IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination]: Table 21—Constants A and B. [3]*

Para determinar las constantes A y B, se escoge los valores en la tabla 9.

Para calcular el voltaje del transformador, se calcula con la ecuación (21).

$$\frac{E_T}{E_A} = 1 + \frac{A}{1 + \frac{B}{K_1}} \quad (21)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{S(T_T + T_A)}{E_A} \quad (22)$$

c. Voltaje en el punto B con transformador: El voltaje de descarga del descargador, se calcula  $E_B$  mediante la ecuación (23).

$$E_B = E_J + 2ST_B \quad (23)$$

Para encontrar el voltaje  $E_J$  se utiliza la ecuación (24) y (25):

$$K_1 = \frac{S \times T_A}{E_A} \quad (24)$$

Por lo tanto, para calcular el voltaje  $E_J$ , se utiliza la ecuación (25):

$$\frac{E_J}{E_A} = 1 + \frac{A}{1 + \frac{B}{K_1}} \quad (25)$$

- d. El BIL del transformador: Para calcular el BIL, se utiliza la ecuación (26).

$$BIL = 1,20 \frac{E_t}{1,10} \quad (26)$$

De la sección 4.6 de la norma IEEE Std C62.82.1-2010, el próximo BIL estándar más alto es el aplicable en la tabla.

- e. Bushing del transformador: Tanto el aislamiento interna como la externa deben considerarse al evaluar el bushing del transformador. El bushing interno se trata de la misma manera que el transformador. La subestación de línea simple está a nivel del mar. El BIL requerido para el aislador externo de porcelana, utiliza la ecuación (27).

$$BIL = \frac{E_t}{1,15} \quad (27)$$

- f. Interruptor de potencia: Para calcular el BIL requerido, se utiliza la ecuación (28).

$$BIL = \frac{E_b}{1,15} \quad (28)$$

- g. Interruptores de desconexión: Se encuentran ubicados con el interruptor, por lo que el BIL es el mismo que el interruptor.
- h. Aisladores de soporte del bus: Los aisladores de soporte de bus están ubicados en toda la estación, por lo que el voltaje de sobre impulso

seleccionado es el máximo encontrado en toda la estación. El BIL requerido se muestra en la ecuación (29).

$$BIL = \frac{E_{B1}}{1,15} \quad (29)$$

- i. Para otros equipos: El voltaje calculado se puede comparar directamente por el nivel de onda colocada por el descargador sobre los equipos. Si las pruebas estándar no requieren una prueba de onda cortada, se puede suponer una capacidad de voltaje de onda cortada de 1,15 veces el BIL. Por lo tanto, si  $\delta$  es la densidad relativa del aire, se utiliza la ecuación (30) y (31) para calcular el BIL en el descargador.

$$\delta = e^{-\frac{A}{8,6}} \quad (30)$$

$$\frac{E_b}{E_d} \geq 1,15; BIL = \frac{E_d}{(1,15 \times \delta)} \quad (31)$$

- j. Distancias entre fases: Se calcula mediante el voltaje calculado más alto en la estación, que es el gradiente de 605 kV/m es para un sobreimpulso de polaridad negativa o un valor de 560 kV/m para una sobreimpulso de polaridad positiva [3]. Por ejemplo, para el caso de estudio el voltaje máximo de estudio es 321,26 kV y se divide para gradiente de sobreimpulso

$$\text{Distancia} = \frac{321,26}{560} = 0,57m \quad (32)$$

### 3.1.4. Etapa 4: Evaluar la coordinación de aislamiento

#### 3.1.4.1 Relación de protección contra descargas atmosféricas

De acuerdo, a la descripción de la curva de resistencia a la contaminación del aislamiento del transformador, la resistencia a la contaminación del aislamiento para transformadores sumergidos en líquido se puede describir mediante una curva continua mostrada en la figura 10, la cual ha sido publicada por miembros del Subcomité de Pruebas Dielectric del Comité de Transformadores de la IEEE [4].

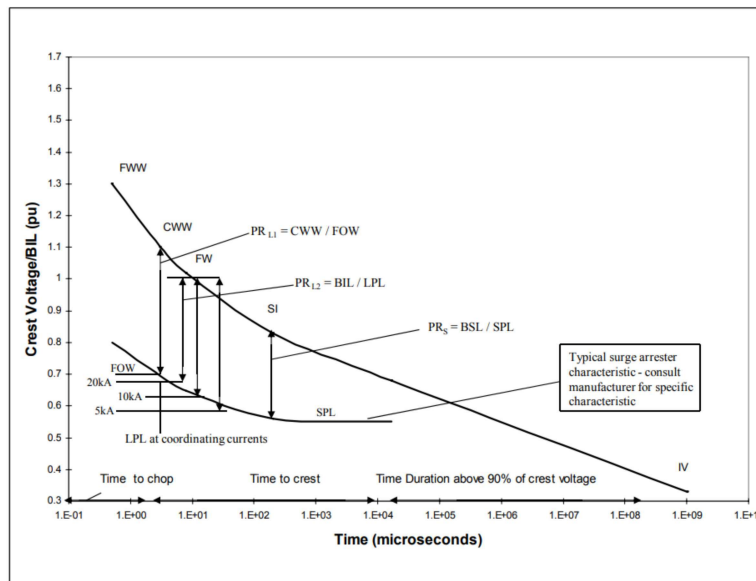


Figura 10: Curvas típicas de voltaje-tiempo para la coordinación de niveles de protección de descargadores con resistencia a la contaminación del aislamiento para transformadores sumergidos en líquido. [Switching Surges I-Phase-to-Ground Voltages AIEE Committee Report]. Figure 9 — Typical transformer and arrester volt-time curves for coordination of arrester protective levels with insulation withstand strength for liquid-filled transformers [4].

Las relaciones para protección contra sobrevoltajes tipo rayo, se calcula  $PR_{L1}$  utilizando la ecuación (33) y para  $PR_{L2}$  se utiliza la ecuación (34)

$$PR_{L1} = \frac{\text{Resistencia de la onda de choque (CWW)}}{\text{Nivel de protección al frente de onda (FOW)}} \geq 1,2 \quad (33)$$

$$PR_{L2} = \frac{\text{Nivel básico de aislamiento para impulso atmosférico (BIL)}}{\text{Nivel de protección para impulso atmosférico (LPL)}} \geq 1,2 \quad (34)$$

### 3.2. Procedimiento según IEC 60071-1

La coordinación de aislamiento se puede definir como la selección del voltaje soportado normalizado de los equipos teniendo en cuenta los sobrevoltajes que pueden manifestarse, así como las características de los dispositivos de protección y las condiciones atmosféricas para obtener un riesgo de falla aceptable [6], la normativa IEC 60071-2 propone 4 etapas para realizar la coordinación de aislamiento mencionados con precedencia en la fig:1, para los voltajes de aislamiento normalizados de la gama I. Para iniciar el proceso de coordinación de aislamiento se necesita como primer punto los parámetros del sistema a analizar en el cual se consideran el voltaje nominal (kV), la frecuencia (Hz), voltaje máxima y la altitud (m.s.n.m).

### 3.2.1. Etapa 1: Determinación de los sobrevoltajes representativos

$$U_{rp}$$

#### 3.2.1.1 Sobrevoltajes temporales

Para un sistema de distribución de sobrevoltajes temporales que se deben analizar son la falla a tierra y por pérdida de carga; la falla a tierra se produce con contacto de una o dos fases a tierra, originando un transitorio a una frecuencia distinta a la que opera el sistema y la pérdida de carga se produce por una desconexión brusca lo que origina un sobrevoltaje entre fases y a tierra. [6]

#### 3.2.1.2 Sobrevoltajes por fallas a tierra

Para el cálculo de los sobrevoltaje temporales a frecuencia industrial por fallas a tierra se lo realiza mediante las utilización de software como el ATP Draw o con la ecuación (35):

$$U_{rp(e-p)} = k \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (35)$$

Donde:

$U_m$  : Voltaje máxima.

$k$  : Factor de falla a tierra.

La normativa IEC 60071-2 anexo A proporciona una guía para la determinación del factor k, mediante la figura 11.

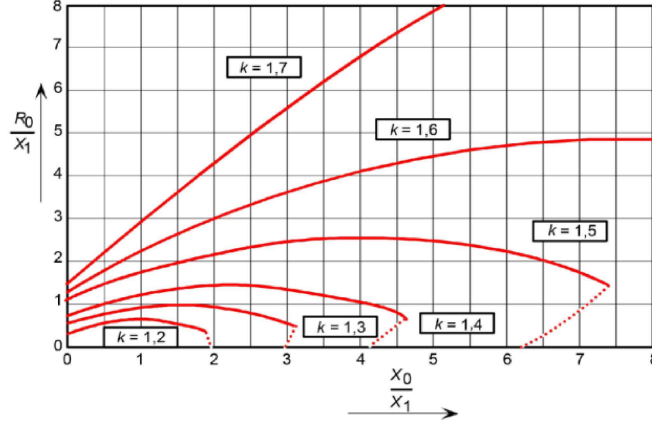


Figura 11: Relación entre  $\frac{R_0}{X_1}$  y  $\frac{X_0}{X_1}$  para los valores constantes del factor de falla a tierra  $k$ . [5]

### 3.2.1.3 Sobrevoltajes por pérdida de carga

Para las sobrevoltajes temporales por pérdida de carga se debe tener en cuenta el factor de deslastre  $K_d$ , el cual se lo obtiene mediante dos formas; a través de la simulación en ATP Draw realizando un bote de carga o utilizando un factor determinístico de 1.15 que establece la norma IEC 60071-2 para sistemas de extensión moderada puede producir sobrevoltajes fase-tierra con una amplitud inferior a 1.2 p.u. [5].

Las ecuaciones para obtener las sobrevoltajes por pérdida de carga fase-fase y fase-tierra son las ecuaciones (36) y (37):

$$U_{rp(p-e)} = k_d \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (36)$$

$$U_{rp(p-p)} = k_d \cdot U_m \quad (37)$$



### 3.2.1.4 Sobrevoltajes de frente lento

Las sobrevoltajes representativos son esenciales en caso de conexión o reenganche, por lo que los equipos ubicados en la entrada de la línea experimentarán diferentes niveles de voltajes de estrés según su posición [5]. Para determinar este tipo de sobrevoltajes se utiliza las distribuciones estadísticas de la figura 12, que permite establecer los voltajes de maniobra que tienen un 2% de ser excedidas y se las conoce como  $U_{e2}$ .

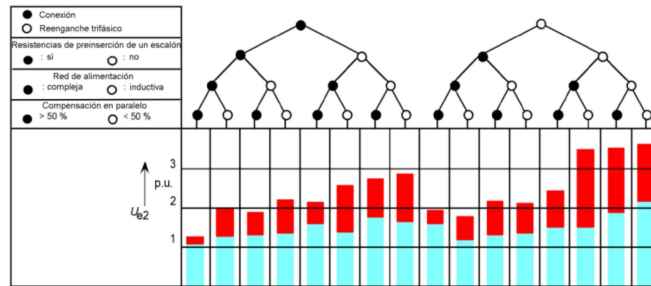


Figura 12: Rango de sobrevoltajes de frente lento al 2% en el extremo de recepción debido la conexión y reenganche de la línea según IEC60071-2. [5]

Para los sistemas de distribución se requiere, únicamente, el rango de conexión porque en estos sistemas las sobrevoltajes por reenergización no son importantes debido a que la carga aportada es improbable, por lo tanto las condiciones típicas a evaluar en un sistema de distribución son: conexión, sin resistencia de reinserción, red compleja y sin compensación paralela, obteniendo de esta manera los valores que se encuentra en la tabla 10.

Tabla 10: Valores a obtener de frente lento fase-tierra

sobrevoltajes representativas de frente lento $U_{e2}$	
fase-tierra(extremo remoto)	máximo
fase-tierra(mínimo)	mínimo
fase-tierra(extremo-local)	promedio de max y min

Además de los valores mencionados anteriormente, es importante obtener los valores  $U_{p2}$  (fase-fase) con el 2% de ser excedido, para obtener estos valores se utiliza la figura 13 la cual muestra el rango de relaciones posibles entre los valores 2% fase-fase y fase-tierra.

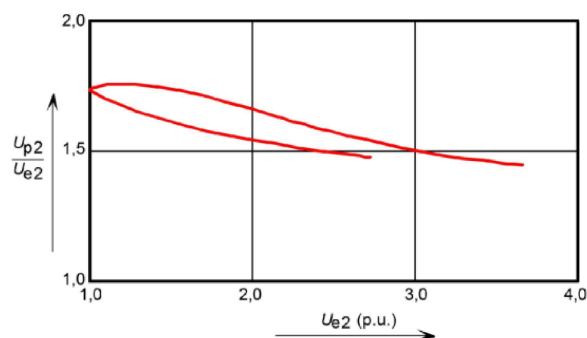


Figura 13: Rango entre los valores 2% de sobrevoltajes de frente lento entre fases y fase-tierra según IEC60071-2. [5]

En los sistemas de distribución se aplica el límite inferior debido a sobrevoltajes de conexión trifásica. Por lo tanto, las condiciones típicas a evaluar en un sistema de distribución son: conexión, sin resistencia de reinserción, red compleja y sin compensación paralela, obteniendo de esta manera los valores que se encuentra en la tabla 11.

Después de haber obtenido los datos de  $U_{e2}$  y  $U_{p2}$ , se procede con el cálculo de los valores de truncamiento estos valores determinan el aislamiento requere-

Tabla 11: Valores a obtener de frente lento fase-fase

sobrevoltajes representativas de frente lento $U_{p2}$	
fase-tierra(extremo remoto)	máximo
fase-tierra(mínimo)	mínimo
fase-tierra(extremo-local)	promedio de max y min

rido de fase-tierra y de fase-fase para sobrevoltajes de maniobra. La norma IEC 60071-2, en el anexo C, establece las formulas por el método fase pico, este método es utilizado para los sistemas de distribución, estas son los voltajes representativas de maniobra, presentados en la ecuación (38) y (39)

$$U_{et} = (1.25 \times U_{e2} - 0.25) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_m \quad (38)$$

$$U_{pt} = (1.25 \times U_{e2} - 0.25) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_m \quad (39)$$

### 3.2.1.5 Descargador contra sobrevoltajes

Para la selección del descargador se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

$U_s$  : voltaje del sistema.

$MCOV$  : valor máximo del funcionamiento continuo.

$U_r$  : clasificación del voltaje del ciclo de trabajo.

$U_{pl}$  : nivel de protección del impulso tipo rayo.

$U_{ps}$  : nivel de protección al impulso tipo maniobra.

De acuerdo con la norma IEC 60071-2, se puede considerar, como una regla general que los descargadores de óxidos metálicos tienen la capacidad

de reducir las amplitudes de las sobrevoltajes fase-tierra (kV cresta) a aproximadamente el doble de las voltajes asignados en los propios descargadores. Esto implica que los descargadores de óxido metálico son adecuados para controlar los sobrevoltajes de frente lento que se producen durante las conexiones y maniobras. [5]

Luego de haber seleccionado el descargador se vuelve a reevaluar los sobrevoltajes representativas de fase-tierra y fase-fase. Conforme a la IEC 60071-2 dice que el valor máximo previsto de fase-tierra es igual al nivel de protección del descargador:  $U_{rp} = U_{ps}$  y en el caso de las sobrevoltajes fase-fase es el doble del nivel de protección del pararrayo o a su vez el valor de truncamiento, tomando el valor mínimo [5].

### **3.2.2. Etapa 2: Voltajes soportadas de coordinación $U_{cw}$**

Para establecer los voltajes de coordinación  $U_{cw}$ , es necesario ajustar los voltajes a las condiciones apropiadas mediante la multiplicación de los voltajes representativos  $U_{rp}$  fase-fase y fase-tierra establecidos en la etapa 1 por factores de coordinación que compensen las discrepancias entre las pruebas de voltaje estándar y las condiciones reales de servicio dentro del sistema de aislamiento [9].

#### **3.2.2.1 Factor de coordinación**

La normativa IEC 60071-2 (5.3.1.2) establece que el factor determinístico de coordinación para los sobrevoltajes temporales a frecuencia industriales  $K_c = 1$  y para los sobrevoltajes de frente lento para equipos no protegidos por descargadores, como es el caso en los sistemas de distribución el factor

determinista es  $K_{cd} = 1$  [5].

Para el cálculo de los voltajes de coordinación las ecuaciones son (40) y (41) para fase-tierra y fase-fase:

$$U_{cw} = k_c \cdot U_{rp} \quad (40)$$

$$U_{cw} = k_{cd} \cdot U_{rp} \quad (41)$$

### 3.2.2.2 Sobrevoltajes de frente rápido $U_{cw}$

Para encontrar las sobrevoltajes de frente rápido, la norma IEC 60071-2, anexo E, establece la ecuación (42):

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \times \frac{L}{((L_{sp} + L_a))} \quad (42)$$

### 3.2.2.3 Los voltajes soportados de coordinación

Para realizar el cálculo de los sobrevoltajes atmosféricas (tipo rayo) se debe hacer uso del método estadístico, que implica extraer la tasa de falla del aislamiento en las redes existentes, de la misma forma el voltaje soportado de impulso tipo rayo  $U_{cw}$  de coordinación, por lo cual, se empleará la ecuación (43) que determinara los parámetros de cálculo de los sobrevoltajes de frente rápido.

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \times \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (43)$$

Donde:

$U_{cw}$  : Voltaje soportable de coordinación al impulso atmosférico.

$U_{pl}$  : Nivel de protección a impulso tipo rayo del descargador seleccionado.

$A$  : Factor del comportamiento de la línea ante las descargas eléctricas, se muestra en la tabla 12.

$n$  : Número mínimo de líneas conectadas a la subestación.

$L$  : La distancia de separación equivalente entre el descargador más cercano y el equipo en consideración establecida en la figura 14.

$L_{sp}$  : Número mínimo de líneas conectadas a la subestación.

$L_a$  : Segmento de línea aérea cuya tasa de defecto es igual a la tasa de fallos.

Para calcular  $L_a$ , se establece la ecuación (44):

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad (44)$$

La norma IEC 60071-2 propone que los equipos tienen una tasa de falla anual de una línea aérea aceptable  $R_a$  debido a las sobrevoltajes desde 0.001/año hasta 0.004/año y para las líneas aéreas, la tasa de fallo de los equipos aceptable  $R_{km}$  varían en un rango de 0,1/100 (km/año) hasta 20/100 (km/año).

Tabla 12: Factor A para diferentes tipos de líneas aéreas

Tipo de línea	A (kV)
líneas de distribución (cebados entre fases): - con las crucetas puestas a tierra (cebado a tierra con una tensión pequeña) - línea con apoyos de madera (cebado a tierra con una tensión alta)	900 2700
Líneas de transporte (cebado fase-tierra) - un solo conductor - haz doble - haz cuádruple - haz de seis u ocho conductores	4500 7000 11000 17000
Nota: Los valores de esta tabla se aplican en la ecuación xx	

Fuente: Los datos proporcionados son de la IEC 60071-2. [5]

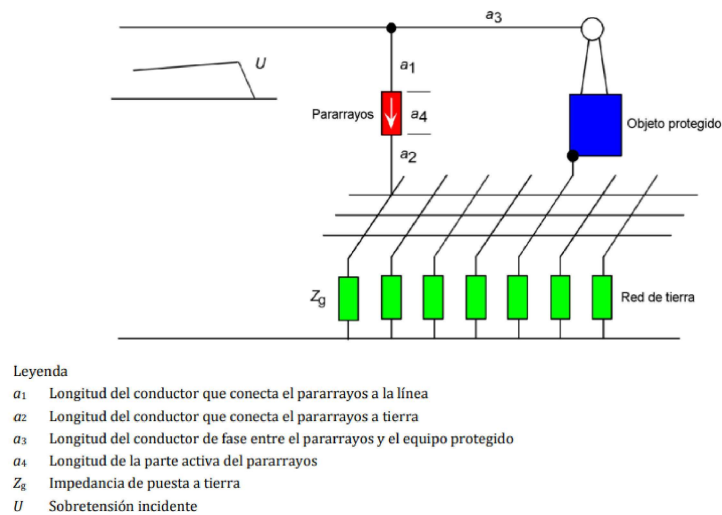


Figura 14: Diagrama de la conexión del pararrayos al objeto protegido según IEC 60071-2 [5].

### 3.2.3. Etapa 3: Voltajes soportados específicos $U_{rw}$

Para determinar los voltajes soportados requeridos  $U_{rw}$ , se deben modificar los voltajes soportados de coordinación  $U_{cw}$  empleando la multiplicación de factores de corrección atmosférico  $k_a$  y de seguridad  $K_s$  [5].

#### 3.2.3.1 Factor de corrección atmosférico

Con el fin de determinar este factor es necesario tener en cuenta la presión atmosférica correspondiente a la altitud del lugar y el nivel de contaminación de la zona a analizar [5]. Para el cálculo del factor  $k_a$  la IEC 60071-2, establece la siguiente ecuación (45).

$$K_a = e^{m \times \frac{H}{8150}} \quad (45)$$

Donde:

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

$m$  : varia de acuerdo al tipo de sobrevoltajes.

Para sobrevoltajes tipo rayo con un valor de  $m = 1$ , para sobrevoltajes a frecuencia industrial de corta duración con un valor de  $m = 1$  de las distancias en el aire y de aisladores limpios. Por ejemplo, para sobrevoltajes tipo maniobra, en la figura 15 se obtiene el valor de  $m$ . Para aisladores contaminados de tensión soportada a frecuencia industrial  $m$  puede variar desde 0,5 aisladores normales hasta 0,8 para los antiniebla [5].



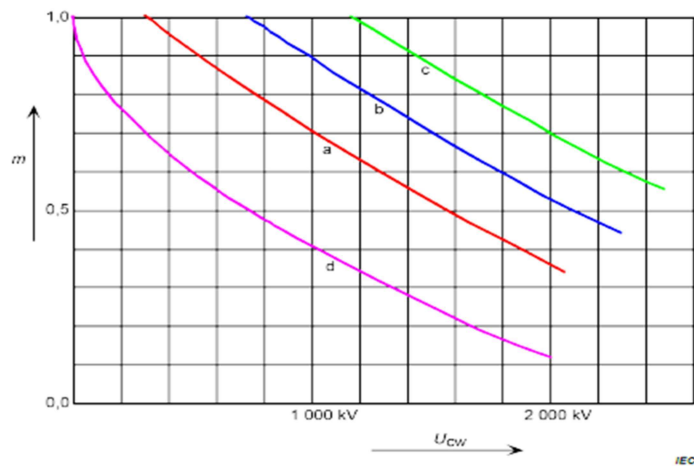


Figura 15: Relación entre el exponente  $m$  y la tensión soportada de coordinación a impulso tipo maniobra según IEC60071-2. [Figura 9 – Relación entre el exponente  $m$  y la voltaje soportada coordinación a impulsos tipo maniobra.] [5].

Donde:

- a: aislamiento fase-tierra.
- b: aislamiento longitudinal.
- c: aislamiento entre fases.
- d: separación punta-plano (separación de referencia).

Para voltajes que consisten en dos componentes, el valor de voltaje es la suma de los componentes.

### 3.2.3.2 Factor de seguridad $K_s$

El factor  $K_s$  considera: pruebas y montaje de equipos, dispersión en la producción, calidad de la instalación, envejecimiento en servicio y otros factores de influencia desconocidos [5].

En caso de que los fabricantes no especifiquen, la norma IEC 60071-2 estipula que los factores de seguridad deben ser aplicados son:

$K_s = 1,15$  para el aislamiento interno.

$K_s = 1,05$  para el aislamiento externo.

Para el cálculo del aislamiento interno fase-tierra y fase-fase de los voltajes soportados especificados se utiliza la ecuación (46), y para el aislamiento externo de fase-tierra y fase-fase se usa la ecuación (47).

$$U_{rw} = U_{cw} \times k_s \quad (46)$$

$$U_{rw} = U_{cw} \times k_s \times k_a \quad (47)$$

### 3.2.4. Etapa 4: Voltajes soportados normalizados $U_w$

Para obtener los voltajes normalizados  $U_w$  se convierte las tensiones de maniobra obtenida en el paso anterior a su equivalente de corta duración y tipo rayo mediante la tabla 13 que proporciona la IEC 60071-2, estos factores de conversión se utilizan únicamente en el rango I.

Tabla 13: Factores de conversión de ensayo para la gama I para convertir los voltajes soportados a impulso tipo maniobra especificadas en voltajes soportados a impulso tipo rayo y a frecuencia industrial de corta duración

Aislamiento	Tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración <sup>a</sup>	Tensión soportada a impulso tipo rayo
Aislamiento externo		
- distancias en el aire y aisladores limpios, en seco:		
• fase-tierra	$0,6 + U_{rw}/8\ 500$	$1,05 + U_{rw}/6\ 000$
• fase-fase	$0,6 + U_{rw}/12\ 700$	$1,05 + U_{rw}/9\ 000$
- aisladores limpios, bajo lluvia	0,6	1,3
Aislamiento interno		
- GIS	0,7	1,25
- aislamiento sumergido en un líquido	0,5	1,10
- aislamiento sólido	0,5	1,00

$U_{rw}$  es la tensión soportada a impulso tipo maniobra especificada en kV.  
a Los factores de conversión de ensayo incluyen un factor de  $1/\sqrt{2}$  para convertir los valores de cresta en valores eficaces.

Fuente: Se obtiene según IEC 60071-2. [5]

## 4. Validación del caso de estudio

Para la aplicación de la coordinación de aislamiento según la norma IEC 60071-2 y la IEEE C62.82.2-2022 se empleará al caso de estudio de una celda de carga ubicada en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca que cuenta con los siguientes datos:



Figura 16: Celda MT seccionador - fusible SM6 QM 24kV Contactos, manual, 630 A, 20 kA. Fuente autoría propia. Ficha técnica en el siguiente url: <https://www.se.com/co/es/product/SM61Q3JHH6Z7CONTA/celda-mt-seccionador-fusible-sm6-qm-24kv-contactos-manual-630a-20ka/>

Se utilizó la hoja de cálculo desarrollada por lo autores, que se encuentra en el url: <https://gie.blog.ups.edu.ec/materiales-academico>.

#### 4.1. Aplicación del archivo excel para la IEC 60071-2

En la primera fase, se requiere:

1. Determinar los parámetros del sistema a analizar, voltaje nominal (kV) y la frecuencia (Hz), los valores que se introducen son los que están subrayado en el excel.

Tension nominal (Us)	22	kV	fase-fase
Tension nominal (Us)	12,7	kV	fase-tierra
Tension (Um) $\pm 5\%$	23,10	kV	fase-fase
Tension base = $\sqrt{2}/\sqrt{3} * U_m$	18,86	kV	1.0 pu(cresta)
Frecuencia nominal [Hz]	60	Hz	

Figura 17: Parámetros del sistema.

2. Solicitar el resultado de corto circuito a nivel de medio voltaje en el alimentador requerido, para el ámbito de este estudio se requiere los datos del alimentador 0422 al ingreso de la carga de la Universidad Politécnica Salesiana.

Corriente de falla trifasica $I_{f\phi 3}$	7,16	kA
Corriente de falla bifasica $I_{f\phi 2}$	6,14	kA
Corriente de falla monofasica $I_{f\phi 1}$	5,54	kA
$x1/R1$	2,66	p.u
$X0/R0$	2,79	p.u

Figura 18: Datos del alimentador 0422.

3. Cálculo de las impedancias de secuencia positiva y cero, la cual servirá posteriormente para la determinación de la etapa 1.

X1		1,66	p.u
R1		0,63	p.u
X0		2,50	p.u
R0		0,90	p.u

Figura 19: Impedancias de secuencia positiva y cero.

En la segunda fase, se requiere:

1. Determinar los sobrevoltajes representativas  $U_{rp}$ , para el cálculo de sobrevoltajes temporales por fallas a tierra se emplea la ecuación (33), en forma complementaria se debe establecer el factor k utilizando el método determinístico mediante la figura 11, tomando como relación  $X0/X1$  y  $R0/X1$  y para los sobrevoltajes temporales por pérdida de carga la norma IEC 60071-2 se establece que el factor  $k_d = 1,15$  y se calcula con las ecuaciones (36) y (37).

X0/X1		1,51	p.u				
R0/X1		0,54	p.u				
Falla a tierra	K	1,30		$U_{rp(p-e)}=K*Um/\sqrt{3}$	17,34 kV	fase-tierra	
Rechazo de carga	Kd	1,15	p.u	$U_{rp(p-e)}=Kd*Um*\sqrt{3}$	15,34 kV	fase-tierra	
				$U_{rp(p-p)}=Kd*Um$	26,57 kV	fase-fase	
Sobretensiones resultantes	$U_{rp(p-e)}=$			<b>17,34 kV</b>		$U_{rp(p-p)}=$	<b>26,57 kV</b>

Figura 20: Datos de sobrevoltajes temporales falla a tierra y por pérdida de carga.

2. Especificar los sobrevoltajes representativos de frente lento, para lo cual se debe calcular los voltajes de truncamiento  $U_{et(fase-tierra)}$  y  $U_{ptfase-fase}$  con las ecuaciones (38) y (39), se determina el valor de  $U_{e2}$  mediante la figura 12, para los sistemas de distribución se requiere únicamente el rango de conexión, porque en estos sistemas los sobrevoltajes por reenergización no son importantes debido a que por los valores de carga

el aporte es improbable; por lo tanto, las condiciones típicas a evaluar en un sistema de distribución son: conexión, sin resistencia de reinserción, red compleja y sin compensación paralela, el valor de  $U_{p2}$  se obtiene mediante la figura 13, dichos valores se evidencian en la figura 22.

Maximo (Ue2) (extremo remoto)		2,55
Minimo (Ue2)		1,30
Extremo Local (Ue2)		1,93
Extremo remoto Up2/Ue2		1,50
Extremo minimo Up2/Ue2		1,65
Up2 Maximo (extremo remoto)		3,83
Up2 Minimo (se suele descartar)		2,15
Up2 Local (otro equipos)		2,99

Figura 21: Valores de  $U_{e2}$  y  $U_{p2}$ .

Luego de obtener dichos valores se procede con el cálculo de los voltajes de truncamiento que se evidencian en la figura 22.

Extremo remoto - Entrada de la linea	Uet	55,40439612	kV fase-tierra
Extremo remoto - Entrada de la linea	Upt	82,06923527	kV fase-fase
Para los sistemas de distribución solo se utiliza el valor máximo.			

Figura 22: Voltaje de truncamiento fase-tierra y fase-fase.

- Para seleccionar el pararrayo, en el presente caso de estudio se utilizó un descargador con las siguientes especificaciones:

*Marca* : OHIO BRASS - PDV-100 OPTIMA - 213715.

*MCOV* : 15.3 kV.

$U_r$  : 18 kV.

$U_{pl}$  : 56.4 kV.

$$U_{ps} : 41.7 \text{ kV.}$$

Longitud de fuga : 295 mm.

En la tercera fase, se requiere:

1. Para determinar las sobrevoltajes de coordinación  $U_{cw}$  a frecuencia industrial, el factor de coordinación determinista es  $K_c = 1$  y para los sobrevoltajes de maniobra el factor determinista es  $K_{cd} = 1$ , estos valores los determina la norma IEC 60071-2 y se calcula con las ecuaciones (40) y (41), obteniendo los valores que se encuentran en la figura 23.

$U_{cw} (f-t) = K_c * U_{rp}(f-t)$	kc	1	17 kV
$U_{cw} (f-f) = K_c * U_{rp}(f-f)$	kc	1	26,6 kV
Equipos de entrada de linea			
Ups/Ue2	0,867021 kcd(f-t)	1	
2Ups/Up2	1,156028 kcd(f-f)	1	
$U_{cw}(p-e) = K_{cd} * U_{rp}(p-e)$	55,4044 kV	fase-tierra	
$U_{cw}(p-p) = K_{cd} * U_{rp}(p-p)$	82,06924 kV	fase-fase	

Figura 23: Sobrevoltajes de coordinación temporales y de maniobra.

2. Para el cálculo de los sobrevoltajes de coordinación de frente rápido se determina con la ecuación (42), la tabla 12 y la figura 14, el cual se detalla en el punto 3.2.2.3, obteniendo los valores presentados en la figura 24:



	L ext	L int
a1: distancia vertical pararrayos-barra (m)	0,5	0,5
a2: distancia pararrayos a malla PT (m)	0,5	0,5
a3: distancia pararrayos-equipo (m)	12	12
a4: longitud vertical del pararrayos (m)	0,295	0,295
L=	13,30	13,30
Lsp =	25	vano
A=	900	Tabla E.2
n (numero de lineas conectadas a la SE) =	3	
Ra: tasa de fallas equipos	0,0050	
Rkm: tasa de fallas	0,04	
La=1000*(Ra/Rkm) (m)	125,00	
Aislamiento externo Ucw	82,99	kV
Aislamiento interno Ucw	82,99	kV

Figura 24: Sobrevoltajes de coordinación de frente rápido externo y interno.

En la cuarta fase, se requiere:

1. Para determinar las voltajes soportadas se utiliza las ecuaciones (46) y (47), asimismo se debe considerar los siguientes factores:  $k_s$  de aislamiento interno y externo el cual la norma determina un  $k_s = 1,05$  externo y un  $k_s = 1,15$  interno, factor de corrección atmosférica  $k_a$  que se calcula con la ecuación (45), el factor m el cual se determina mediante la figura 15 y varia de acuerdo al sobrevoltaje y la latitud H donde se realiza el estudio. Se muestra en la figura 25.

<b>Aislamiento interno: <math>U_{rw} = U_{cw} * k_s</math></b>		
<b>Aislamiento externo: <math>U_{rw} = U_{cw} * k_s * k_a</math></b>		
Aislamiento Externo $k_s$	1,05	Valor norma
Aislamiento Interno $k_s$	1,15	Valor norma
Altitud H	2526	msnm
m=Sobretensiones temporales (f-f y f-t)	0,8	
m=Sobretensiones frente lento (f-t)	1	
m=Sobretensiones frente lento (f-f)	1	
m=Sobretensiones frente rapido (f-t y f-f)	1	
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN ATMOSFERICO</b>		
$K_a$ TOV	1,281	
$K_a$ (Switchero F-T)	1,363	
$K_a$ (Switchero F-F)	1,363	
$k_a$ (rayos)	1,363	
<b>Tension soportada a las sobretensiones temporales</b>		
	Externo	Interno
Fase - tierra	22,87	19,55
Fase - Fase	35,78	30,59
<b>Tension soportada al impulso tipo maniobra</b>		
	Externo	Interno
Fase - tierra Entrada linea	79,29	63,72
Fase - Fase Entrada linea	117,45	94,38
<b>Tension soportada al impulso tipo rayo</b>		
	Externo	Interno
Fase - tierra	118,77	95,44
Fase - Fase	118,77	95,44

Figura 25: Voltajes soportados específicos a las sobrevoltajes temporales, tipo maniobra y tipo rayo.

- Finalmente se realiza la conversión de los sobrevoltajes de maniobra soportados específicos hacia los voltajes normalizadas para la gama I de frecuencia industrial y tipo rayo, utilizando los factores de conversión que se encuentra en la tabla 13.

## 4.2. Aplicación del archivo excel según la IEEE C62.82.2-2022

Para poder utilizar, el excel proporcionado en el url: Los recuadros en amarillo son aquellos que se cambian de acuerdo al estudio a ejecutar.

En la primera fase, se requiere:

1. Colocar parámetros iniciales  $U_m$  (voltaje máximo del sistema),  $U_s$  (voltaje nominal) y la frecuencia (Hz), siendo los valores marcados aquellos que se deben cambiar, se muestra en la figura 26.

PARAMETROS INICIALES				
Voltaje	Um	28.2	kV	fase-fase
Voltaje nominal	Us	22	kV	fase-fase
Voltaje nominal	Us	12.7	kV	fase-tierra
Voltaje RMS	URMS	14.11	kV	
Voltaje	Um ±5%	23.10	kV	fase-fase
Voltaje base	$\sqrt{2}/\sqrt{3} \cdot U_m$	18.0	kV	1.0 pu(cresta)
Frecuencia nominal	f	60	Hz	

Figura 26: Parámetros iniciales del sistema.

2. Solicitar los resultados de corto circuito a nivel de medio voltaje en el alimentador 0422 establecido. En la figura 27, se muestra aquellos valores.

RESULTADOS DE CORTO CIRCUITO A NIVEL DE MEDIA TENSIÓN EN EL ALIMENTADOR 0422				
	Corriente de falla trifásica	If $\emptyset$ 3	7,156	kA
	Corriente de falla bifásica	If $\emptyset$ 2	6,139	kA
	Corriente de falla monofásica	If $\emptyset$ 1	5,535	kA
		x1/R1	2,655	p.u
		X0/R0	2,792	p.u

Figura 27: Resultado de cortocircuito a nivel de medio voltaje.

3. Cálculo de la impedancia de thevenin a secuencia positiva y negativa como:  $X_1$ ,  $R_1$ ,  $X_0$  y  $R_0$ . En la figura 28, se muestra.

CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE THEVENIN SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA				
	X1		1,881	p.u
	R1		0,626	p.u
	X0		2,502	p.u
	R0		0,896	p.u

Figura 28: Valores para el cálculo de la impedancia.

4. Para el cálculo del TOV, debe colocar el valor  $K_e$  de acuerdo, a la norma IEEE C62.82.2 - 2022 e IEEE C62.22-2009. Se muestra en la figura 29.

1.2 SOBREVOLTAJES TEMPORALES				
Según la norma Std C62.82.2				
Falla a tierra	Ke	1,30 pu	COV = 1,05*Us/V3	14,00 kV (fase-tierra)
Según la norma IEEE Std C62.22-2009			TOV = COV*Ke	18,20 kV (fase-fase)
Falla a tierra	Ke	63,50 %	TOV = Um*Ke(%)	16,64 kV (fase-fase)
Sobretensiones resultantes	TOV (fase - fase)	18,20 kV		

Figura 29: Cálculo del valor  $K_e$ .

5. Debe colocar, el valor de  $K_t$  que depende de la configuración de la puesta tierra para seleccionar el descargador. Además el valor de  $K_o$  que depende del factor de diseño del fabricante, en su mayoría tiene un valor de 0,8. Se muestra en la figura 30

1.3 VOLTAJE NOMINAL DEL DESCARGADOR			
Factor Kt		Kt	1,15
Factor de diseño del fabricante		Ko	0,8
		Ro = COV / ko	17,5045 kV
		Re = TOV / kt	15,8302 kV
Voltaje nominal del descargador		Ur	17,5045 kV

Figura 30: Determinación del  $U_r$

6. Con el valor de MCOV y  $U_r$  se escoge el descargador para el caso de estudio.
7. Se coloca los voltajes característicos del descargador, se muestran en la figura 31.


1.5 CARACTERÍSTICAS DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSION PARA 22 KV.																																																																																																																																											
EQUIPO SELECCIONADO																																																																																																																																											
MARCA: OHIO BRASS					U <sub>s</sub>	22 kV																																																																																																																																					
CONDICIÓN DE OPERACIÓN: IEC 60099-4					U <sub>p-e</sub>	12.70 kV																																																																																																																																					
MODELO: PDV-100 OPTIMA					U <sub>r</sub>	18 kV																																																																																																																																					
SERIAL: 213715					MCOV	15.3 kV																																																																																																																																					
MATERIAL: POLIMERO					FOW	63.1 kV																																																																																																																																					
					TOV(1s)	23.5 kV																																																																																																																																					
					TOV(10S)	22.2 kV																																																																																																																																					
					LPL 8/20 µs (10 kA)	56.4 kV																																																																																																																																					
					LPL 8/20 µs (5 kA)	51.7 kV																																																																																																																																					
					LPS 60/100 µs (0.5KA)	41.7 kV																																																																																																																																					
					Tamaño	295 mm																																																																																																																																					
<b>Electrical Characteristics</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Max. Discharge Current (kA)</th> <th>Max. Energy (kJ)</th> <th>Max. Voltage (kV)</th> <th>Max. Current (kA)</th> <th>Max. Energy (kJ)</th> <th>Max. Voltage (kV)</th> <th>Max. Current (kA)</th> <th>Max. Energy (kJ)</th> <th>Max. Voltage (kV)</th> <th>Max. Current (kA)</th> </tr> <tr> <th>1s</th> <th>10s</th> <th>100s</th> <th>1s</th> <th>10s</th> <th>100s</th> <th>1s</th> <th>10s</th> <th>100s</th> <th>1s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr> <tr><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td></tr> <tr><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td><td>300</td></tr> <tr><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td><td>400</td></tr> <tr><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td><td>500</td></tr> <tr><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td></tr> <tr><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td><td>700</td></tr> <tr><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td><td>900</td></tr> <tr><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td><td>1000</td></tr> </tbody> </table>					Max. Discharge Current (kA)	Max. Energy (kJ)	Max. Voltage (kV)	Max. Current (kA)	Max. Energy (kJ)	Max. Voltage (kV)	Max. Current (kA)	Max. Energy (kJ)	Max. Voltage (kV)	Max. Current (kA)	1s	10s	100s	1s	10s	100s	1s	10s	100s	1s	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000					
Max. Discharge Current (kA)	Max. Energy (kJ)	Max. Voltage (kV)	Max. Current (kA)	Max. Energy (kJ)	Max. Voltage (kV)	Max. Current (kA)	Max. Energy (kJ)	Max. Voltage (kV)	Max. Current (kA)																																																																																																																																		
1s	10s	100s	1s	10s	100s	1s	10s	100s	1s																																																																																																																																		
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100																																																																																																																																	
200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200																																																																																																																																	
300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300																																																																																																																																	
400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400																																																																																																																																	
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500																																																																																																																																	
600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600																																																																																																																																	
700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700																																																																																																																																	
800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800																																																																																																																																	
900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900																																																																																																																																	
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000																																																																																																																																	

Figura 31: Características del descargador.

En la segunda fase, se requiere:

1. En sobrevoltajes a frecuencia industrial, se debe insertar el valor del factor a tierra que es 1,30 según IEEE C62.82.2-2022 y el factor de rechazo de carga se obtiene de la tabla 5. Los valores se evidencian en la figura 32.

DETERMINACIÓN DE SOBREVOLTAJE A FRECUENCIA INDUSTRIAL/ TEMPORALES					
1.1 CALCULO TOV					
Falla a tierra	Ka	1.30	TOV(fase-tierra)	k*Um/V3	17.00 kV
Factor de falla a tierra (Ke)			TOV(fase-tierra)	Kd*Um/V3	18.67 kV
			TOV(fase-fase)	Kd*Um	32.00 kV
Rechazo de carga	Kd	1.40 o.u			
sobretensión máx (Kd)					
Sobrevoltajes resultantes		<b>TOV (fase-tierra)=</b>	<b>18.67 kV</b>	<b>TOV(fase-fase)=</b>	<b>32.00 kV</b>

Figura 32: Determinación del TOV.

2. Para determinar la longitud de fuga, en la tabla 7 se escoge el valor de la contaminación del sitio en  $Le = mm/in$ . El valor seleccionado, se muestra en la figura 33.

1.4 LONGITUD DE FUGA			
Línea de Fuga (mm) =	$Um (kV) / \sqrt{3} \times Le (mm/kV)$	Le =	34 mm/kV
Longitud de Fuga (mm)	453 mm		

Figura 33: Determinación de la longitud de fuga.

Para la tercera fase, se requiere:

1. Conocer los datos principales para sobrevoltaje por impulso tipo rayo en el sistema. Los mismos se muestran en la figura 34.

DATOS PARA EL BIL, CALCULOS APLICADOS PARA IEEE Std. 62.82.2 - 2022					
Descripción de los datos	Valores	Unidades	Descripción de los datos	Valores	Unidades
Voltaje máximo del sistema (Us)	22	kV	Altura de la torre (h)	20	m
Impedancia dinámica	450	$\Omega$	Wano (w)	42	m
CFO (fase-fase)	46		Longitud del tramo (S)	40	m
Switching impulse protective level (SPL)	41,7	kV	Distancia de la estructura al aislador	0,3	m
Lightning impulse protective level (LPL)	56,4	kV	Distancia entre el descargador y la unión descargador (TA)	6	m
Número de líneas conectadas al bus	4		Distancia entre la unión descargador-bus y el interruptor (Tb)	30	m
BFR (Back flash rate)	0,01	km/años	Distancia entre unión descargador-bus y el transformador (T1)	6	m
MTBF	100	años	Distancia entre unión descargador-bus y el extremo abierto de la línea (Tc)	18	m

Figura 34: Datos requeridos para sobrevoltaje por impulso tipo rayo.

2. Se obtiene el voltaje máximo para calcular el sobrevoltaje por impulso tipo rayo, para esto se necesita conocer el CFO del sistema. Los valores se muestra en la figura 35.

1,2 SOBREVOLTAJES TIPO RAYO			
Linea de fuga		0,453 m	
CFO	560	kV/m	CFO (p-e) = 146,61 kV
CFO (p-p)=	253,93	kV	V3 (p-e) = 115,82 kV
E (p-p)=	304,7190058	kV	E (p-e) = 175,93 kV

Figura 35: Determinación del voltaje  $E(p - p)$  y  $E(p - e)$ .

3. Determinar la pendiente del sobrevoltaje entrante, para esto se necesita conocer la constante del efecto corona que esta en la tabla 8 y el incremento de la distancia por la ubicación de la siguiente torre. Los valores se muestra en la figura 36.

Dado que la longitud del vano es de 250 metros, esta distancia se incrementa a 300 metros (la siguiente ubicación de la torre) y, empleando una constante de corona ks es de 1700, se calcula la pendiente de la sobrevoltaje entrante.													
$K_s =$	1700		$S = \frac{K_s}{d}$										
$d =$	0,35												
$S =$	4857	kV/ $\mu$ s											
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conductor</th> <th><math>K_s</math> (kV - km <math>\mu</math>s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Single conductor</td> <td>700</td> </tr> <tr> <td>Two conductor bundle</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>3 or 4 conductor bundle</td> <td>1700</td> </tr> <tr> <td>6 or 8 conductor bundle</td> <td>2500</td> </tr> </tbody> </table>	Conductor	$K_s$ (kV - km $\mu$ s)	Single conductor	700	Two conductor bundle	1000	3 or 4 conductor bundle	1700	6 or 8 conductor bundle	2500
Conductor	$K_s$ (kV - km $\mu$ s)												
Single conductor	700												
Two conductor bundle	1000												
3 or 4 conductor bundle	1700												
6 or 8 conductor bundle	2500												

Figura 36: Determinación de la pendiente de sobrevoltaje por impulso tipo rayo.

- Determinar los tiempos que dependen de la distancia para calcular la constante  $K_1$  y obtener el BIL requerido para el transformador. Además, de la tabla 9 se coloca el valor de las constante A y B. Los valores son presentados en la figura 37.

c) Transformador		
Se determinan los tiempos y se calcula K1:		
$K_1 = \frac{S(T_T + T_A)}{E_A}$		T = d / 300000000
	TA	0,02 $\mu$ s
	TB	0,1 $\mu$ s
	TT	0,02 $\mu$ s
	TC	0,06 $\mu$ s
K1 =		2,27
La constante A y B, se determina de la tabla y se calcula, como se muestra:		
	A	0,68
	B	0,25
Number of lines	A	B
1	1	0.14
2	0.98	0.16
3	0.84	0.18
4	0.68	0.25

Figura 37: Determinación del voltaje para el transformador.

Para la cuarta fase, se considera:

- La verificación de la coordinación de aislamiento, para esto se utiliza las ecuaciones (33) y (34), cada valor de estas ecuaciones tienen que ser mayor a 1,2 para tener una correcta evaluación. Los resultados se muestran en la figura 38.

CWW	385	6,101426307	tiene que ser mayor a 1,2 según IEEE C82.22-2009.
FOW	63,1		
LPL	56,4	2,216312057	

Figura 38: Evaluación de la coordinación de aislamiento.

### 4.3. Análisis de resultado

Para el caso de estudio realizado se tomo como referente la celda de carga de medio voltaje SM6-24kV Schneieder para validad la guia de coordinación de aislamiento según los estándares IEEE C62.82.2 - 2022 e IEC 60071-2 se obtuvo los siguientes resultados. La elección de los voltajes normalizados para soportar frecuencias industriales e impulso de tipo rayo se basa en determinar el nivel de aislamiento necesario para los equipos del sistema, calculando luego el nivel estándar de aislamiento correspondiente.

#### 4.3.1. Análisis de resultados según el estándar IEEE C62.82.2-2022

Los resultados obtenidos se evidencian en la tabla 14. Estos valores encontrados son pertenecientes a el transformador, bushing del transformador que tiene aislamiento interno y externo, el descargador, interruptor de potencia, disyuntor y la barra del aislador son analizados en esta sección. se detalla: Para el caso del transformador se tiene un voltaje requerido de 115,65 kV y en la tabla 2 indica que para sobrevoltaje por impulso tipo rayo, el nivel de aislamiento seleccionado del sistema es 125 kV. El bushing del transformador tiene aislamiento interno con un voltaje requerido de 115,65 kV y para el aislamiento externo de 92,19 kV y para ambos se tiene un nivel de aislamiento seleccionado de 125 kV. Para el caso de pararrayo el voltaje requerido es 52,34 kV y aunque el voltaje tipo cresta es 85,59 kV siendo mayor por motivos de seguridad, el nivel de aislamiento seleccionador es 125 kV.



Tabla 14: Resultados del nivel de aislamiento para los componentes del sistema.

Equipo	Voltajes	kV	BIL Requerido [kV]	BIL Estándar [kV]	BIL Seleccionado [kV]
Transformador	$E_t$	106.01	115.65	125	125
El bushing del transformador					
Aislamiento Interno	$E_t$	106.01	115.65	125	125
Aislamiento Externo		106.01	92.19	110	125
Descargador	$E_A$	85.59	52,34	60	125
Interrupor de potencia	$E_b$	209,64	181.97	200	350
Disyuntor	$E_b$	209.64	181.97	200	350
Barra del aislador	Distancia	321,26	279.36	350	350

*Fuente: Los datos obtenidos son los del caso de estudio.*

Para el sistema en análisis, los valores obtenidos se presentan en la tabla 15; se observa que el voltaje a frecuencia industrial requerido es 32 kV y el nivel de aislamiento estándar es 40 kV. Para el caso del sobrevoltajes por impulso tipo rayo se requiere 115,82 kV y el nivel de aislamiento es 125 kV.

Tabla 15: Resultados del nivel de aislamiento de voltajes del sistema.

Valores de $U_{rw}$ [kV]	Nivel de aislamiento requerido [kV]	Nivel de aislamiento estándar [kV]
Máximo voltaje del sistema	26,2	
Voltaje a frecuencia industrial (fase - tierra)	32,00	40,00
voltaje tipo rayo V3E (fase - tierra)	115,82	125

*Fuente: Los datos obtenidos son los del caso de estudio.*

### 4.3.2. Análisis de resultados según el estándar IEC 60071-2

Para el mismo caso de estudio propuesto, aplicando la norma IEC 60071-2 se obtienen los resultados presentados en la tabla 16.

Tabla 16: Voltajes soportados específicos mínimos

Valores de Urw (kV)	Aislamiento Externo			Aislamiento Interno	
	Equipos en entrada de línea				
Valores de Urw (kV)	Conexión	Urw (s)	Urw (c)	Urw (s)	Urw (c)
Voltaje a frecuencia industrial	fase - tierra	22,87	<b>48,39</b>	19,55	<b>44,60</b>
	fase - fase	35,78	<b>71,56</b>	30,59	<b>66,07</b>
Voltaje tipo maniobra	fase - tierra	79,29	-	63,71	-
	fase - fase	117,45	-	94,38	-
Voltaje tipo rayo	fase - tierra	118,77	<b>103,08</b>	95,44	<b>79,69</b>
	fase - fase	118,77	<b>124,86</b>	95,44	<b>117,97</b>

*Nota: Valores resultantes de la coordinación de aislamiento para el caso de estudio propuesto.*

De los voltajes soportados a frecuencia industrial en fase-tierra, el valor máximo es de 48,32 kV y de fase-fase máximo es de 71,56kV por lo tanto, se debe constatar en la tabla 1 los voltajes normalizados de rango I y se debe elegir el voltaje normalizado a frecuencia industrial que cumpla con el valor mínimo de fase-tierra y fase-fase. El voltaje soportado tipo rayo máximo es de 124,86 kV por lo cual se debe elegir el valor normalizado al impulso tipo rayo que cumpla con este requerimiento, en la tabla 17 se muestra los voltajes normalizados que se seleccionan para este caso de estudio.

Tabla 17: Voltajes soportados normalizados.

<b>Voltajes soportados normalizados de rango I según IEC 60071-2</b>		
Máximo voltaje para el material Um kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado a los impulsos tipo rayo kV (valor eficaz)
24	50	125

*Nota: Valores seleccionados de la gama I para la coordinación de aislamiento para el caso de estudio propuesto.*

#### 4.3.3. Comparativa de resultados de las normativas aplicadas

En función a los resultados obtenidos en las tablas 14 y 17 se puede determinar que los voltajes soportados a frecuencia industrial obtenidos mediante la norma IEEE C62.82.2-2022 es menor a la que se obtiene con el método de la IEC 60071-2, debido a los distintos factores que estas aplican en su norma. Los resultados comparativos, se muestra en la tabla 18.

Tabla 18: Voltajes normalizados IEC 60071-2 y IEEE C62.82.2-2022.

<b>Voltajes soportados normalizados de rango I según IEC 60071-2</b>		
Máximo voltaje para el material Um kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado a los impulsos tipo rayo kV (valor eficaz)
24	50	125
<b>Voltaje estándares para sistemas tipo I según IEEE C62.82.2-2022</b>		
26,2	40	125

*Nota: Los valores obtenidos se obtuvo mediante la aplicación de los dos métodos estudiados a sistemas de distribución.*

#### 4.4. Comparación entre normativas

Para este caso de estudio, en la tabla 19 se realiza la comparativa entre las normativas.

Tabla 19: Procedimiento y características entre la norma IEEE C62.82.2-2022 y IEC 60071-2.

Características/ Procedimiento	Según la norma IEEE Std C62.82.1	Según la norma IEC 60071-2
Límites de voltajes	Sistema clase I: 15 kV a 242 kV	Sistemas rango I: 3,6 kV a 245 k V
Sobrevoltajes representativos	- Sobrevoltajes a frecuencia industrial. - Sobrevoltajes por impulso tipo rayo.	- Sobrevoltajes a frecuencia industrial originadas por fallas a tierra y pérdida de carga. - Sobrevoltajes por impulso tipo rayo.
Voltajes normalizados	Los voltajes se referencia de la tabla 2 de la norma IEEE C62.82.2-2010	Los voltajes se referencia de la tabla 1 de la norma IEC 60071-1.
Método para coordinar el aislamiento	Emplea el método determinístico y estadístico	Emplea el método determinístico y estadístico
Nomenclatura	- Sobrevoltajes a frecuencia industrial. - Sobrevoltaje por impulso tipo de rayo. - Voltaje soportado específicos para equipos. - Nivel básico de aislamiento.	Sobrevoltajes: - (U <sub>rp</sub> ). - (U <sub>cw</sub> ) (U <sub>rw</sub> ). - (U <sub>w</sub> ).
Selección del descargadpr	- MCOV - Voltaje $U_r$ - FOW	- MCOV - U <sub>pl</sub> - TOV - U <sub>r</sub>

Factores empleados en las normas se evidencian en la tabla 20.

Tabla 20: Descripción de los factores empleados entre la norma IEEE C62.82.2-2022 y IEC 60071-2.

<b>Factores empleados durante la coordinación de aislamiento</b>	<b>Según la norma IEEE Std C62.82.1</b>	<b>Según la norma IEC 60071-2</b>
Factor de falla a tierra	Se calcula el sobrevoltaje a frecuencia industrial, con el valor de k igual a 1,30.	Se determina mediante la figura 11 y depende de la relación $R_O/X_1$ y $X_O/X_1$
Factor de espaciamiento	No se calcula para sistemas de distribución.	No se calcula para sistemas de distribución.
Factor de coordinación	No se calcula para sistemas de distribución.	Para sobrevoltajes temporales y de frente lento, $K_c$ es igual a 1.
Factor de coordinación determinístico	No se calcula	Para sobrevoltajes temporales y de frente es $K_c$ es igual a 1.
Factor de seguridad	- Calculo del BIL para sobrevoltajes tipo rayo, se recomienda que este factor sea 1,15.	- Para sobrevoltajes tipo temporal, frente lento y frente rápido, se toma los siguientes valores: Para el aislamiento externo, $K_s = 1,05$ . Para aislamiento interno, $K_s = 1,15$ .
Corrección atmosférica	No se emplea	Se tiene en cuenta la altitud y el factor m el se determina de la figura 15 el cual varía según el sobrevoltaje

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

La norma IEEE C62.82.2-2022 e IEC 60071-2 consta de una tabla de voltajes normalizados, en la tabla de la IEEE C62.82.2-2022 se derivan los voltajes máximos del sistema, el impulso tipo rayo (fase-tierra) y el sobrevoltaje a corta duración, mientras en la norma IEC 60071-2 presenta el voltaje más elevado para equipos, voltaje de soportabilidad normalizada para impulsos de corta duración a frecuencia industrial y el voltaje de soportabilidad normalizado para impulso tipo rayo. Se identifica que la norma IEEE es flexible para determinar constantes en el calculo de sobrevoltajes del sistema mientras que la IEC 60071-2 es conversador y profunda para realizar el estudio de coordinación.

Las normas comparadas abordan la protección contra sobrevoltajes, aunque pueden tener enfoques, ligeramente diferentes, en cuanto a los métodos de evaluación y selección de equipos de protección. Puede haber diferencias en la terminología y los métodos de cálculo utilizados en cada norma, lo que puede afectar la forma en que se implementan y aplican en proyectos específicos.

Para el caso de estudio, según el estándar IEEE C62.82.2-2022, en el interruptor de potencia, disyuntor y barra del aislador tiene valores muy elevados

porque en sistemas de distribución no se contempla aquellos valores, aun así se calcula para conocer los voltajes requeridos en el sistema.

La norma IEC 60071-2 utiliza un método determinista que consiste en establecer los sobrevoltajes máximos a los que se puede someter el sistema, para seleccionar el mínimo nivel de aislamiento requerido para equipos a proteger, para esto se deben determinar factores tales como seguridad, coordinación, factores de conversión y factores de corrección atmosférica, los cuales son importantes para determinar los voltajes soportados específicos a frecuencia industrial y tipo rayo.

La guía desarrollada se basó en las directrices y recomendaciones establecidas en las normativas mencionadas, con el propósito de proporcionar un conjunto coherente de procedimientos y criterios para la coordinación de aislamiento en sistemas de distribución. Se tuvieron en cuenta aspectos como el nivel de voltaje, las características del equipo, las curvas mencionadas en cada normativa, la selección del pararrayos, los requisitos de seguridad y la determinación de los niveles normalizados para la gama I de la IEC 60071-2 y para los de tipo I de la IEEE C62.82.2-2022.

La validación de la guía se llevó a cabo mediante la implementación del caso de estudio a una celda de carga ubicada en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Se aplicaron los procedimientos y criterios propuestos en la guía respecto a las normas IEC 60071-2 y IEEE C62.82.2-2022, evaluando la eficacia y aplicabilidad de las recomendaciones en condiciones

reales. Los resultados obtenidos respaldaron la idoneidad de la guía para la coordinación de aislamiento en sistemas de distribución, por lo tanto, la guía propuesta cumple con los criterios a aplicar en la coordinación de aislamiento para sistemas de niveles de voltajes en sistemas de distribución.

Si se ejecuta un sobre dimensionamiento en el estudio de coordinación, conlleva costos adicionales, limitaciones operativas y una mayor complejidad en el diseño. Por lo tanto, es importante para los profesionales del sector eléctrico capacitarse y actualizarse en los procesos de coordinación de aislamiento.

La herramienta de cálculo desarrollada en este proyecto facilitará a los profesionales la ejecución rápida del estudio de coordinación de aislamiento a nivel de distribución.

El impacto ambiental se ve presente al haber un falla afecta a los descargadores, interruptores de potencia entre otros al darse una falla se desprenden gases o aceites que afectan a la sociedad. Por lo tanto, es necesario realizar una adecuada coordinación de aislamiento.

Esta guía puede ser utilizada como referencia para asegurar una coordinación adecuada del aislamiento y garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas de distribución eléctrica.



## 5.2. Recomendaciones

Los futuros proyectos de investigación podrían considerar un análisis comparativo entre el estándar IEEE C62.82.1 e IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento en sistemas de subtransmisión (voltajes hasta 69 kV).

Para realizar un estudio de coordinación que permita ajustar a valores exactos del sistema, se recomienda realizar estudios mediante simulaciones para llevar a determinar los valores que se tomarán para la coordinación de aislamiento.

Otro aspecto a recomendar para proyectos futuros, es estudiar los diferentes tipos de descargadores en el contexto de la coordinación de aislamiento para realizar una evaluación exhaustiva de las características y capacidades de cada tipo de descargador disponible en el mercado. Esto incluye entender cómo funcionan, cuáles son sus características de sobrevoltaje y corriente, su capacidad de respuesta y su eficacia para proteger equipos sensibles en el sistema de distribución eléctrica.

Para normativa IEEE C62.82.2-2022 se recomienda ser inclusiva en directrices más específicas o actualizadas sobre la evaluación y selección de dispositivos de protección contra sobrevoltajes, como los descargadores de sobrevoltaje, incluyendo recomendaciones para su ubicación óptima en el sistema de distribución.

Para la carrera de Electricidad, se recomienda trabajar en casos de estudio prácticos o resolver problemas de la sociedad con el uso software profesionales del sector eléctrico. Además que el estudiante tenga la disponibilidad de ser parte de los cursos de formación de continua para seguir formándose en forma paralela a la trayectoria universitaria.

## Referencias

- [1] “Ieee standard for insulation coordination—definitions, principles, and rules,” *IEEE Std C62.82.1-2010 (Revision of IEEE Std 1313.1-1996)*, pp. 1–22, April 2011.
- [2] “Ieee guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems,” *IEEE Std C62.22-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997)*, pp. 1–142, 2009.
- [3] “Ieee guide for the application of insulation coordination,” *IEEE Std C62.82.2-2022*, pp. 1–83, March 2023.
- [4] “Switching surges i-phase-to-ground voltages aiee committee report,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 80, no. 3, pp. 240–256, April 1961.
- [5] “Iec coordinación de aislamiento parte 2: Guía de aplicación,” *UNE-EN IEC Std 60071-1*, pp. 1–192, October 2018.
- [6] J. A. Martínez Velasco, *Coodinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*, J. L. García Jurado, Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U., 2007, ISBN: 978-84-481-6697-7, vol. 1.
- [7] “Coordination insulation, definitions, principles, and rule,” *International Electrotechnical Commission (IEC) 60071-1*, vol. Editin 7.0, pp. 1–26, November 1993.