

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**COMPARACIÓN DE LAS NORMAS IEC 60071-2 E IEEE  
Std C62.82.1 PARA LA COORDINACIÓN DE  
AISLAMIENTO EN SISTEMAS TIPO I**

**ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO BAJO LA NORMA IEEE Std  
C62.82.1 CON APLICACIÓN A DOS MODELOS TEÓRICOS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA**

**NICOLYN DAMARI RIVERA HIDALGO**

[nicol.damari@hotmail.com](mailto:nicol.damari@hotmail.com)

**DIRECTOR: Dra. XIMENA PATRICIA GAVELA GUAMAN**

[ximena.gavela@epn.edu.ec](mailto:ximena.gavela@epn.edu.ec)

**DMQ, febrero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Nicolyn Damari Rivera Hidalgo declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**NICOLYN DAMARI RIVERA HIDALGO**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Nicolyn Damari Rivera Hidalgo, bajo mi supervisión.

---

**XIMENA PATRICIA GAVELA GUAMAN**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

NICOLYN DAMARI RIVERA HIDALGO

XIMENA PATRICIA GAVELA GUAMÁN

## DEDICATORIA

A mis padres Alfonso y Luz María, por haberme impulsado cada día a seguir adelante y a no desmayar ante las adversidades, por su inmenso apoyo durante toda mi carrera Universitaria, por cada palabra de aliento y por cada sacrificio, recordaré siempre el desayuno servido cada mañana y los mensajes o llamadas de apoyo cuándo tuve algún examen. *¡LOS AMO!*

A mis hermanos Royel y Samir, espero ser su ejemplo para seguir, ejemplo de lucha constante para que puedan superarse cada día y puedan ser mejores, sé que lo lograrán.

A mis abuelitos Jorge y Gladys (+), por siempre creer en mí y darme palabras de aliento para seguir adelante.



## AGRADECIMIENTO

A Dios y la Virgen María por permitir que pueda culminar mi carrera, por fortalecerme todos los días y por permitirme creer, sin perder la fe a pesar de las dificultades.

*Tuyos son, Señor, la grandeza y el poder, la gloria, la victoria y la majestad. Tuyo es todo cuanto hay en el cielo y en la tierra. Tuyo también es el reino, y tú estás por encima de todo. De ti proceden la riqueza y el honor; tú lo gobiernas todo. En tus manos están la fuerza y el poder, y eres tú quien engrandece y fortalece a todos. Por eso, Dios nuestro, te damos gracias, y a tu glorioso nombre tributamos alabanzas.*

*(1 Crónicas 29:11-13)*

A mis padres, hermanos, amigos y compañeros, no ha sido sencillo el camino pero gracias a sus aportes, a su bondad y apoyo he logrado culminar esta meta, son una parte fundamental de mi vida.

A la Ingeniera Ximena Patricia Gavela, por su dirección en el desarrollo de este trabajo de integración curricular.

A la Escuela Politécnica Nacional por permitirme formar parte de esta honorable institución.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3 ALCANCE .....	2
1.4 MARCO TEÓRICO .....	3
1.4.1 SOBREVOLTAJES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS .....	3
1.4.2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO .....	5
1.4.2.1 Métodos de coordinación de aislamiento.....	6
1.4.2.2 Tipos de Aislamiento .....	7
1.4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO SEGÚN LA NORMA IEEE Std C62.82 .....	8
2 METODOLOGÍA.....	30
2.1 EJEMPLO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA UN SISTEMA DE 230 kV.....	30
2.1.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE LOS SOBREVOLTAJES DEL SISTEMA DE 230 kV.....	31
2.1.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE LOS VOLTAJES SOPORTADOS POR LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE 230 kV. ....	34
2.1.3 ETAPA 3: CALCULAR Y SELECCIONAR LOS NIVELES DE AISLAMIENTO ESTÁNDAR PARA EL SISTEMA DE 230 kV .....	38
2.2 EJEMPLO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA UN .....	39
SISTEMA DE 24 kV .....	39
2.2.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE LOS SOBREVOLTAJES DEL SISTEMA DE 24 kV.....	41
2.2.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE LOS VOLTAJES SOPORTADOS POR LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE 24 kV.....	43

2.2.3 ETAPA 3: CALCULAR Y SELECCIONAR LOS NIVELES DE AISLAMIENTO ESTÁNDAR PARA EL SISTEMA DE 24 KV .....	47
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ...	49
3.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO CON LA NORMA IEEE Std C62.82.1 .....	49
3.1.1 EJEMPLO 1: SISTEMA DE 230 KV .....	49
3.1.2 EJEMPLO 2: SISTEMA DE 24 KV .....	51
3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS NORMAS IEEE STD. C62.82.1 Y LA NORMA IEC 60071-2 .....	52
3.2.1 COMPARACIÓN DEL PROCEDIMIENTO GENERAL Y CARACTERÍSTICAS PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LAS NORMAS IEEE STD C.62.82.1 E IEC 60071-2.....	52
3.2.2. COMPARACIÓN DE LOS FACTORES QUE SE EMPLEAN EN LAS NORMAS IEEE STD C.62.82.1 E IEC 60071-2.....	56
3.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS NORMAS IEEE STD C.62.82.1 E IEC 60071-2.....	58
3.2.3.1 Comparación de los resultados para un sistema de 230 kV.....	59
3.2.3.2 Comparación de los resultados para un sistema de 24 kV.....	60
3.3 CONCLUSIONES .....	62
3.4 RECOMENDACIONES .....	63
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
5 ANEXOS .....	1

## RESUMEN

La coordinación de aislamiento es parte fundamental de la fase de investigación, estudio y diseño de subestaciones y líneas. Con un adecuado procedimiento se puede asegurar que el nivel de aislamiento cumpla con criterios técnicos y económicos óptimos, garantizando que los equipos puedan soportar los sobrevoltajes más comunes que pueden aparecer y asegurando a su vez la continuidad en el servicio del suministro de energía eléctrica.

Los estándares internacionales para la coordinación de aislamiento como la IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2, tienen como objetivo establecer o encontrar un nivel apropiado de aislamiento a través de metodologías o procedimientos propios, desarrollados por cada una de las normas.

En este trabajo de integración curricular se analiza el procedimiento de coordinación de aislamiento de la norma IEEE Std C62.82.1 para sistemas tipo I. Para el efecto se analiza la norma aplicándola a dos ejemplos teóricos propuestos, con el fin de tomar los resultados para el análisis comparativo de la norma en referencia, con la norma IEC 60071-2.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis comparativo, coordinación de aislamiento, norma IEC 60071-2, norma IEEE STD C62.82.1, sistemas tipo I, sobrevoltajes.

## **ABSTRACT**

Insulation coordination is a fundamental part of the research study and design phase of substations and lines. With an adequate procedure, it is possible to ensure that the insulation level meets optimal technical and economic criteria, guaranteeing that the equipment can withstand the most common overvoltages that may appear, in turn ensuring the continuity of the electrical energy supply service.

International standards for insulation coordination such as IEEE Std C62.82.1 and IEC 60071-2 aim to establish or find an appropriate level of insulation through their methodologies or procedures, developed by each of the standards.

This curricular integration work analyzes the insulation coordination procedure of the IEEE Std C62.82.1 standard for type I systems. For this purpose, the standard is analyzed by applying it to two theoretical examples proposed, to take the results for the comparative analysis of the standard in reference, with the IEC 60071-2 standard.

**KEYWORDS:** Comparative analysis, insulation coordination, IEC 60071-2 standard, IEEE STD C62.82.1 standard, type I systems, overvoltages.

# 1 INTRODUCCIÓN

La coordinación de aislamiento se define como la selección de la rigidez dieléctrica de los materiales que forman parte de los equipos de un Sistema Eléctrico de Potencia - SEP, en base al voltaje soportado ante la presencia de posibles eventos de falla, maniobras o descargas atmosféricas, considerando factores ambientales y las características de los dispositivos de protección [1].

La norma IEC 60071-1[1] clasifica a los sistemas de potencia en sistemas tipo I y II. Los sistemas de distribución y subtransmisión normalmente diseñados y operados en niveles de voltajes inferiores a 245 kV (tipo I), están expuestos permanentemente a fallas inherentes a su operación o situaciones externas como contacto o caídas de objetos sobre las líneas y/o descargas atmosféricas, las cuales son la principal fuente de sobrevoltajes para estos sistemas. El diseño o selección inadecuada del aislamiento en estos sistemas puede ocasionar un sobredimensionamiento del aislamiento con el consecuente gasto económico que esto generaría, y por otro lado, un riesgo de daño del aislamiento, lo cual ocasiona la interrupción de la continuidad de servicio eléctrico, daños en los equipos y pérdida de su vida útil.

Normas internacionales como la IEC 60071-2 [11] e IEEE Std C62.82.1 [1], establecen recomendaciones sobre los criterios y procedimiento que deberían cumplirse para la coordinación de aislamiento en sistemas de medio y alto voltaje. Sin embargo, los lineamientos y ejemplos de estudio dados en las normas no establecen un proceso detallado para el análisis de sobrevoltajes esperados, con la explicación sobre los cálculos y criterios que deben aplicarse para un estudio de coordinación de aislamiento considerando las distintas particularidades de los sistemas eléctricos.

Dada la necesidad de estudiantes, docentes y profesionales de la carrera de ingeniería eléctrica de identificar qué norma sería más recomendable para la coordinación de aislamiento bajo distintas circunstancias; en el presente Trabajo de Integración Curricular, se desarrolla un estudio detallado de coordinación de aislamiento para dos modelos teóricos, con el objetivo de describir los lineamientos y criterios que deben cumplirse para la selección de parámetros de cálculo para diferentes sistemas, así como el análisis de resultados respectivos.

La norma que se aplica para el efecto es la IEEE, a través de los estándares IEEE Std C62.82.1 e IEEE 1313.2. Los resultados son comparados con los obtenidos bajo la norma IEC 60071-2 que se presentan en el producto 2 del Proyecto de Integración Curricular *Comparación de las normas IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I* desarrollado por otra estudiante<sup>1</sup>. El análisis comparativo y crítico de los resultados obtenidos en este trabajo, frente los obtenidos en el producto 2 en referencia, constituyen una guía importante, que permitirá a los lectores la selección de los criterios más adecuados para el estudio y selección del aislamiento en sistemas tipo I.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis comparativo de la norma IEEE Std C62.82.1 con respecto a la norma IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Describir las causas más comunes de sobrevoltajes en sistemas tipo I.
2. Analizar y detallar el procedimiento para la coordinación de aislamiento para sistemas tipo I, establecido en la norma IEEE STD C62.82.1.
3. Aplicar el procedimiento de coordinación de aislamiento a dos modelos teóricos de sistemas tipo I con el fin de comparar los resultados con los obtenidos bajo la aplicación de la norma IEC 60071-2.
4. Realizar recomendaciones para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I, con base a los resultados obtenidos en el análisis comparativo.

## **1.3 ALCANCE**

En este trabajo de integración curricular se analizarán los puntos más relevantes para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I, con base a lo establecido en la norma IEEE Std. C62.82.1.

Para el efecto se aplicará el procedimiento establecido en la norma a dos sistemas teóricos que se proponen en las mismas normas, con el fin de comparar los resultados obtenidos

---

<sup>1</sup> El producto 2 fue elaborado por otra estudiante, y consiste en aplicar la norma IEC 60071-2 para la coordinación del aislamiento de los mismos ejemplos teóricos aplicados en este trabajo con fines comparativos.

bajo el procedimiento de la norma IEEE Std. C62.82.1, frente a los resultados presentados en otro trabajo bajo la aplicación de la norma IEC 60071-2.

Se hace un énfasis especial en que este trabajo no tiene por objetivo el desarrollo de un estudio de coordinación, sino más bien del análisis detallado de un caso de estudio teórico con fines comparativos de los procesos o metodologías de coordinación propuestos por las normas.

Se evaluarán los resultados teóricos de la coordinación aplicando las dos normas y con base al análisis comparativo crítico, también se recogerán las principales recomendaciones sobre la selección y/o cálculo de los parámetros que son parte del estudio de la coordinación de aislamiento en este tipo de sistemas, así como la conveniencia de utilizar una u otra norma según sea el caso.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 SOBREVOLTAJES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS**

Los sistemas eléctricos de potencia están sometidos permanentemente a sobrevoltajes de origen interno, los cuales pueden ser de tipo temporal, como los ocasionados por fallas, rechazo de carga, de tipo maniobra como la energización de líneas y otros elementos de la red, y de origen externo como los provocados por descargas atmosféricas.

Considerando que los sobrevoltajes son situaciones inherentes a la operación de los sistemas, que si bien pueden limitarse, no se pueden evitar o mitigar completamente, una adecuada coordinación de aislamiento es fundamental para escoger un nivel de aislamiento que garantice la protección de los equipos y la continuidad del servicio eléctrico ante cualquier falla originada por estos sobrevoltajes.

Para el efecto la norma IEEE Std. C62.82.1 estandariza los niveles de aislamiento para los sistemas eléctricos, en función del voltaje eficaz máximo entre fases, clasificándose de la siguiente manera:

- Sistemas tipo I: con voltajes de 15 kV hasta los 242 kV.
- Sistemas tipo II: con voltajes mayores a los 242 kV.

La misma norma, presenta la siguiente clasificación para los sobrevoltajes (Figura 1.1):





**Figura 1.1.** Tipos de Sobrevoltajes según la norma IEEE Std-62.82.2. Elaboración propia en base a la referencia [1].

- Sobrevoltajes Temporales: el origen de estos sobrevoltajes es por fallas, rechazo de carga y condiciones de ferresonancia [1].

Características:

**Tabla 1.1.** Características sobrevoltajes temporales

Origen del Sobrevoltaje	Valor p.u.	Duración
Por fallas (frecuencia industrial)	1.3	1 [s]
Por rechazo de Carga	Menor a 1.2	Mayor a 1 [s]
Por ferresonancia	1.5 a 2.0	Orden de segundos

- Sobrevoltajes de Conmutación: el origen de estos sobrevoltajes es por fallas, operaciones de conmutación y descargas atmosféricas [1].

Características:

**Tabla 1.2.** Características sobrevoltajes de conmutación

Origen del Sobrevoltaje	Valor p.u.	Duración
Por operaciones de conmutación	Menor a 4	20 a 5000 [us]
Por descargas atmosféricas	De 2 a 3	20 [us]

- Sobrevoltajes Frente rápido: el origen de estos sobrevoltajes se da como resultado del inicio de fallas causadas por rayos [1].

Características:

**Tabla 1.3.** Características sobrevoltajes de frente rápido

<b>Origen del Sobrevoltaje</b>	<b>Valor p.u.</b>	<b>Duración</b>
<b>Por descargas atmosféricas</b>	Menor a 6	1.2 [us]

- Sobrevoltajes de frente muy rápido: el origen de estos sobrevoltajes se da por operaciones de conmutación o fallas asociadas a la operación de interruptores [1].

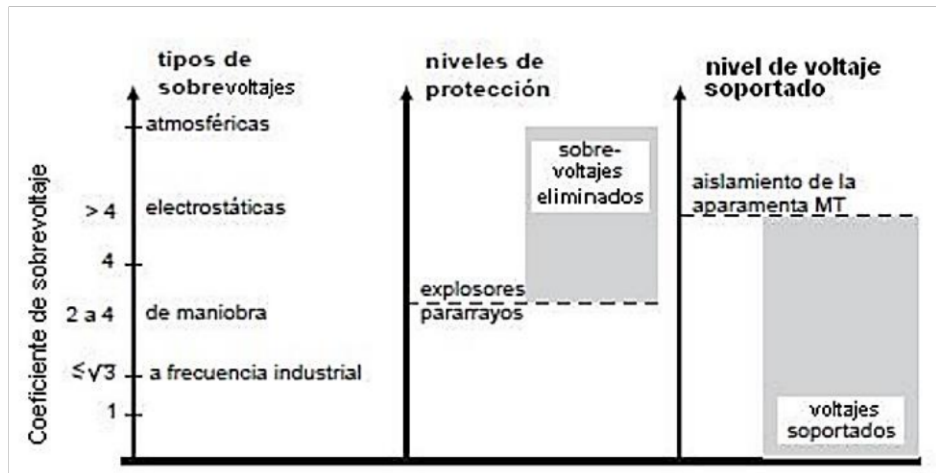
Los principales sobrevoltajes a los que están expuestos los sistemas de tipo I, son del tipo temporal por fallas a frecuencia industrial y de frente rápido por descargas atmosféricas [1].

#### **1.4.2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO**

La norma IEC 60071-1 determina que el objetivo principal de la coordinación de aislamiento es proteger a los equipos e impedir que los dispositivos de protección se dañen, por lo que, se debe seleccionar niveles de aislamiento adecuados para los equipos de una subestación en función de los sobrevoltajes que pueden aparecer en la red, tomando en cuenta las características de los dispositivos de protección y las condiciones ambientales para obtener resultados con una condición de riesgo aceptable [2].

Para la selección óptima de aislamiento en base a la referencia [3] se debe considerar el origen y distribución estadística de los sobrevoltajes que se pueden originar en la red, como las características de los diferentes tipos de aislamiento, dispositivos de protección que se pueden instalar (los cuales deben ser elegidos en el orden de la Figura 1.2) y los costos de implementar los procedimientos de las normas como resultado del estudio de coordinación de aislamiento.

Para determinar el nivel de sobrevoltaje que soportan los equipos y dispositivos eléctricos, se requiere un estudio previo de las condiciones de la instalación, como el grado de contaminación, condiciones ambientales del lugar de instalación y la utilización de los elementos que forman parte de la subestación.



**Figura 1.2.** Nivel de protección y voltaje soportado para los tipos de sobrevoltajes que pueden aparecer en el sistema eléctrico [4].

#### 1.4.2.1 Métodos de coordinación de aislamiento

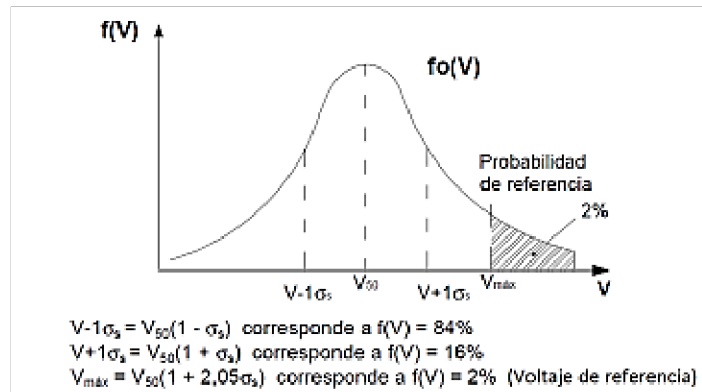
Los métodos que se utilizan para la coordinación de aislamiento con la norma IEEE Std 1313.2 son el determinístico y estadístico, la implementación de uno u otro método depende de la información disponible del sistema [5].

##### a) Método Estadístico

Para utilizar el método estadístico se requiere conocer la función de densidad en base a la distribución estadística de los sobrevoltajes representativos del sistema y la probabilidad de falla del aislamiento, con esta información se puede obtener la tasa de falla de un equipo frente a un esfuerzo dieléctrico [3].

El caso del análisis estadístico considera distribuciones normales, para las cuales el voltaje máximo es el voltaje con un 2% de probabilidad de ser superado, con lo que se asume cierto nivel de riesgo para disminuir el costo y dimensionamiento del aislamiento<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> En el Anexo 5 y 6 de la referencia [4] se detalla las distribuciones de probabilidad normales y su aplicación para determinar el valor de amplitud de los sobrevoltajes representativos.



**Figura 1.3.** Distribución Gaussiana de Sobrevoltajes representativos [4].

Este método se emplea principalmente en sistemas con aislamientos regenerables.

*b) Método determinístico*

Se puede utilizar este método cuando no se conoce la función de distribución estadística de los sobrevoltajes representativos del sistema, se conoce como un método convencional, los cálculos se basan en tomar el máximo sobrevoltaje que soporta el sistema [3]. Se emplea principalmente en sistemas con aislamientos no autoregenerables.

La utilización de este método permite estimar la frecuencia de falla en función de los factores de diseño del sistema, y puede optimizar el aislamiento si los costos de la interrupción se relacionaran con los diferentes tipos de falla. En la práctica esto no es factible debido a la dificultad de evaluar las consecuencias de fallas del aislamiento en diferentes configuraciones de la red y debido a la incertidumbre sobre el costo de energía no entregada.

**1.4.2.2 Tipos de Aislamiento**

El aislamiento eléctrico se define como el material con escasa capacidad de conducción de energía eléctrica que se utiliza para evitar que las partes conductoras entren en contacto, evitar riesgo de cortocircuitos y alejar a los usuarios de las partes energizadas [3].

El aislamiento eléctrico se clasifica según la finalidad de uso y según sus características, como se presenta en la tabla 1.4.

**Tabla 1.4.** Clasificación de tipos de aislamiento eléctrico [1] [6].

<b>Clasificación</b>	<b>Definición</b>
<b>Finalidad de uso:</b>	
Interno	Corresponde al aislamiento formado por elementos internos del equipo, pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, al ser internos están protegidos de las condiciones externas, como contaminación y humedad.
Externo	Corresponde al aislamiento del aire y las superficies expuestas a un aislamiento sólido, por lo general los equipos con este aislamiento están expuestos a los efectos de las condiciones atmosféricas, como contaminación y la humedad.
<b>Según sus características:</b>	
Autoregenerable	Es el aislamiento que puede recuperar sus propiedades aislantes luego de una descarga disruptiva; el aislamiento de este tipo es por lo general un aislamiento externo.
No Autoregenerable	Es el aislamiento que pierde sus propiedades aislantes o no las recupera por completo luego de una descarga disruptiva; el aislamiento de este tipo es por lo general un aislamiento interno.

### **1.4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO SEGÚN LA NORMA IEEE Std C62.82**

Para el análisis de la coordinación de aislamiento que se propone en este trabajo se hace uso de las siguientes normas:

- Norma IEEE Std C62.82.1-2010, versión actualizada de la norma IEEE Std 1313.1-1997 en donde se determina definiciones, principios y reglas.
- Norma IEEE Std 1313.2-1999, guía de aplicación para la coordinación de aislamiento.

- Norma IEEE Std C62.11-2012, en donde se determina los estándares de voltajes en pararrayos de óxido- metal para voltajes mayores a 1 kV.
- Norma IEEE Std 1243-1997, en donde se establecen recomendaciones para la resistencia de aislamiento.

El procedimiento que se seguirá para la coordinación de aislamiento es el establecido en la norma IEEE Std C.62.82.1 [1], cuyas etapas principales se muestran en la tabla 1.5 y que se describen a continuación:

**Tabla 1.5.** Procedimiento coordinación de aislamiento según la norma IEEE Std-62.82.1. Elaboración propia con base a la referencia bibliográfica [1].

<b>PROCEDIMIENTO PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO SEGÚN LA NORMA IEEE Std.C62.82.1</b>			
<b>ETAPA</b>	Etapa 1: Cálculo de los sobrevoltajes del sistema.	Etapa 2: Cálculo de los voltajes soportados por los elementos del sistema.	Etapa 3: Cálculo y selección de los niveles de aislamiento estándar
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Definir y calcular las principales características de los sobrevoltajes más representativos.	Calcular el voltaje soportado por el pararrayos y transformador del sistema.	Realizar el cálculo del aislamiento para los equipos del sistema, y seleccionar el nivel de aislamiento adecuado.
<b>PROCESO</b>	<p><b>Para sobrevoltajes temporales: por fallas a frecuencia industrial</b></p> <p>Se debe calcular:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Valores máximos de cresta (VPF).</li> <li>• Voltaje soportado (<math>V_{3-VPF}</math>).</li> </ul>	<p><b>En el pararrayos</b></p> <p>Se requiere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoger el MCOV mínimo en base al voltaje eficaz del sistema.</li> <li>• Calcular el voltaje de descarga.</li> <li>• Calcular la resistencia del pararrayos.</li> </ul>	<p><b>Para equipos del sistema</b></p> <p>Calcular el BIL de cada elemento del sistema y escoger un nivel estándar, en base a los valores recomendados por la norma de la tabla 1.12 que se presenta en este TIC.</p>

	<p><b>Para sobrevoltajes de frente rápido por impulso tipo rayo</b></p> <p>Se debe calcular:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de flashover (CFO), en base al factor espacio y la densidad relativa del aire.</li> <li>• Valor de cresta del sobrevoltaje de entrada (E).</li> <li>• Voltaje soportado (<math>V_{3-VPF}</math>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcular el voltaje de arranque.</li> <li>• Calcular la corriente de descarga.</li> <li>• Calcular el voltaje soportado por el pararrayos.</li> </ul> <p><b>En el transformador</b></p> <p>Se requiere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcular la distancia a la descarga disruptiva.</li> <li>• Calcular la inclinación de flashover.</li> <li>• Seleccionar las constantes A y B.</li> <li>• Calcular la constante de tiempo K1.</li> <li>• Calcular el voltaje soportado por el transformador.</li> <li>• Calcular el voltaje a tierra en los terminales del transformador.</li> </ul>	<p><b>Para sobrevoltajes temporales por fallas a frecuencia industrial</b></p> <p>Escoger el nivel de aislamiento de la tabla 1.13 que se presenta en este TIC, en función al grado de contaminación y la cadena de aisladores del sistema y en función del valor más cercano al sobrevoltaje calculado en la etapa 1.</p> <p><b>Para sobrevoltajes de frente rápido por impulsos de tipo rayo</b></p> <p>Escoger el valor del nivel de aislamiento de la tabla 1.14 que se presenta en este TIC, en función del valor más cercano al sobrevoltaje calculado en la etapa 1.</p>
--	--	---	---

A continuación se presenta la descripción de cada etapa:

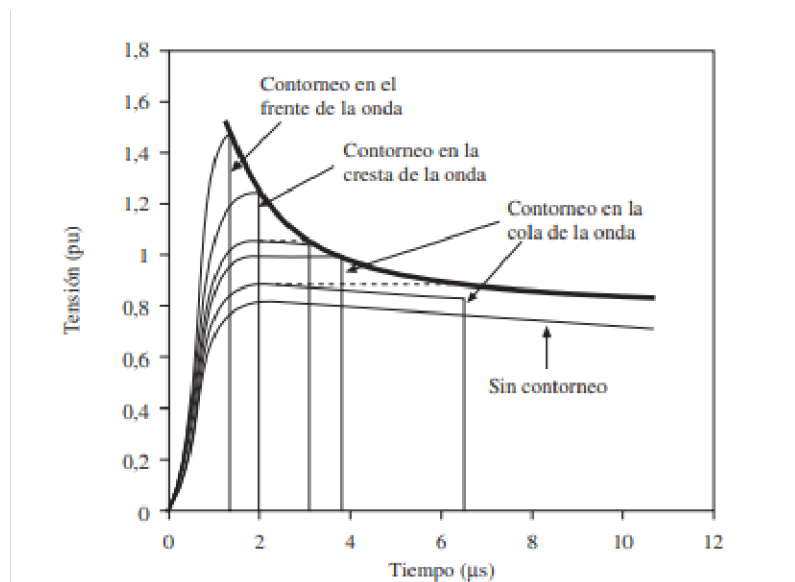
### **Etapa 1: Cálculo de los sobrevoltajes del sistema.**

#### **Conceptos básicos**

Para el desarrollo de esta etapa es necesario introducir los siguientes conceptos:

- Cresta del sobrevoltaje: es el pico máximo que alcanza el sobrevoltaje, puede alcanzar valores de decenas de kilovoltios [kV] y una duración del orden de microsegundos. Pueden ser originados por el impacto de un rayo o descargas atmosféricas en el sistema eléctrico [7].
- Flashover: es la descarga disruptiva que se origina cuando el campo eléctrico entre dos conductores supera un valor crítico, la descarga disruptiva atraviesa un proceso de ionización conocido como pre-ruptura, luego ocurre la ruptura (efecto avalancha) donde los electrones consiguen atravesar el espacio comprendido entre dos electrodos y finalmente la descarga cuando se supera el nivel de umbral [3].

El proceso de la descarga disruptiva se representa mediante las curvas voltaje-tiempo, en el que se indica los valores máximos de voltaje en los que se produciría el contorneo de la onda ante una descarga atmosférica, como se indica en la figura 1.4.



**Figura 1.4.** Curva Voltaje-Tiempo [3].

- Sobrevoltajes fase-fase: son sobrevoltajes que se producen a causa de fallas entre las fases de un sistema eléctrico, está relacionado con fallas bifásicas o trifásicas,



también por fallas ocasionadas en operaciones de conmutación como energización y re-energización de líneas y rechazo de carga.

- Sobrevoltajes fase-tierra: son sobrevoltajes que se producen a causa de fallas entre la fase y tierra del sistema eléctrico.
- Sobrevoltaje de interrupción crítica (CFO): es la amplitud de voltaje de la forma de onda de sobrevoltajes, que bajo condiciones específicas puede alcanzar el 50% del voltaje máximo del sistema, como se indica en la figura 1.5. [1].

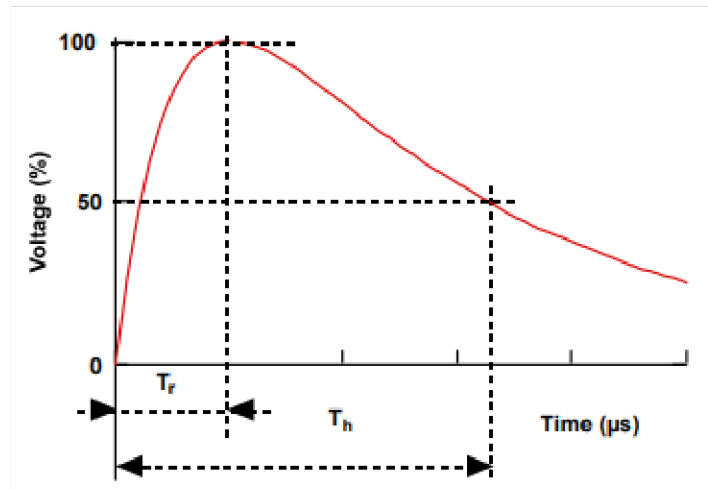


Figura 1.5. Representación del CFO [1].

### **Procedimiento:**

Al tratarse de sistemas tipo I, los sobrevoltajes representativos son temporales por fallas a frecuencia industrial y de frente rápido por impulso tipo rayo.

#### *a) Sobrevoltajes temporales:*

Son sobrevoltajes a frecuencia industrial, se determina un voltaje normalizado a frecuencia industrial mediante el cálculo del valor máximo de cresta del sobrevoltaje  $V_{PF}$  y el cálculo del voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial  $V_{3-VPF}$ .

- Valor máximo de Cresta:

La causa más frecuente del sobrevoltaje temporales es por fallas monofásicas, que se producen cuando existe contacto de una fase a tierra, originando un transitorio a una frecuencia distinta a la de operación del sistema.

Para determinar el valor máximo que alcanza estos sobrevoltajes es necesario identificar el factor de falla a tierra  $k$ , conociendo el tipo de neutro del sistema. Este factor depende de la configuración de red.

El valor máximo de cresta es el sobrevoltaje a frecuencia industrial, que se define como la relación entre el voltaje eficaz máximo y el factor de falla a tierra, como se describe en la ecuación 1.1 [3].

$$V_{PF} = k \times E_m \quad (1.1)$$

Donde:

$E_m$  : es el voltaje máximo del sistema [8].

$k$ : factor de falla a tierra.

El valor del factor de falla a tierra  $k$  depende de la conexión de neutro a tierra del sistema como se establece en la tabla 1.6.

**Tabla 1.6.** Valores representativos del factor de defecto a tierra [3].

Conexión del neutro	Factor de falla a tierra (k)
Neutro rígido a tierra	1.4
Neutro no rígido a tierra	1.7
Neutro aislado	1.9

- Voltaje soportado a frecuencia industrial  $V_{3-VPF}$  :

Tal como se describió en la Tabla 1, deben calcularse los voltajes soportados a frecuencia industrial. En base a lo mencionado, el voltaje soportado determina la soportabilidad del aislador, como establece la norma IEEE Std C.1313-2, el voltaje soportado  $V_{3-VPF}$  debe ser igual al sobrevoltaje a frecuencia industrial como se indica en la ecuación 1.2:

$$V_{3-VPF} = V_{PF} \quad (1.2)$$

*b) Sobrevoltajes por impulso tipo rayo*

Para determinar el sobrevoltaje por impulso tipo rayo es necesario calcular el voltaje de flashover, el valor de cresta del sobrevoltaje de entrada y voltaje soportado.

- Voltaje de flashover (CFO):

El valor de CFO se determina a través de pruebas de laboratorio en condiciones ambientales estándar<sup>3</sup>, en donde se debe considerar el factor de espacio de la cadena de aisladores  $k_g$ , como lo indica la norma IEEE Std 1313.2 mediante la ecuación 1.3:

$$CFO = k_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}} \quad (1.3)$$

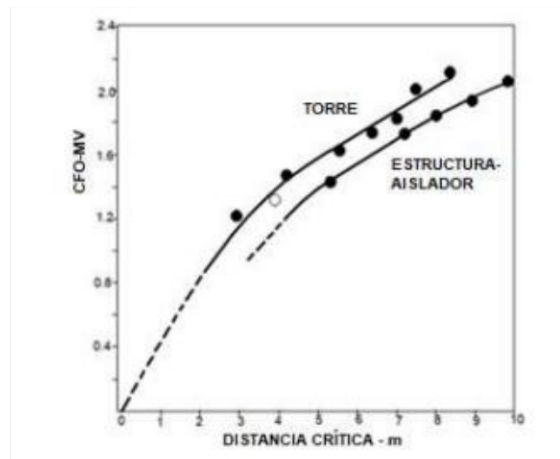
Donde:

$k_g$ : factor de espacio.

S: distancia crítica en metros.

El CFO definido en la ecuación 1.3 se mide en kilovoltios [kV].

La distancia crítica corresponde a la máxima distancia entre el amortiguador de vibraciones y el cuerpo de la torre (Torre) o la distancia entre el conductor y la cruceta superior (estructura-aislador) [9], estas distancias en relación con el CFO se representan mediante curvas como se puede observar en la figura 1.6:



**Figura 1.6.** Máximo CFO en una Torre [9].

Para una cadena de aisladores, el factor de espacio ( $k_g$ ) se calcula mediante la ecuación 1.4.

$$k_g = 1.25 + 0.005 \left( \frac{h}{S} - 6 \right) + 0.25 \left( e^{-\frac{8w}{S}} - 0.2 \right) \quad (1.4)$$

<sup>3</sup> Las condiciones ambientales estándar de un sistema implican: 1) Temperatura ambiente: 20 ° C, 2) Presión de aire: 101,3 kPa o 760 mm Hg, 3) Humedad absoluta: 11 gramos de agua / m<sup>3</sup> de aire y 4) Para pruebas en húmedo: 1 a 1,5 mm de agua / minuto [7]

Donde:

h: altura del conductor de fase en metros.

w: ancho de la torre en metros.

S: distancia crítica en metros.

Para el aislamiento fase-tierra, la norma recomienda los siguientes valores de factor de espaciamento  $k_g$  que depende de la configuración del espaciamento, como se indica en la tabla 1.7.

**Tabla 1.7.** Valores típicos del factor de espaciamento según la norma IEEE Std 1313.2 [4]

Configuración del espaciamento	Factor de espaciamento $k_g$
Barra -Plano	1.00
Barra -Plano vertical	1.30
Barra-plano horizontal	1.35
Conductor -estructura lateral	1.30
Conductor -Plano	1.15

Se realiza una corrección atmosférica en el caso que se tenga elevaciones distintas al nivel del mar, en este caso se considera la densidad relativa del aire para el cálculo del CFO mediante la ecuación 1.5:

$$CFO_A = \delta^m \times CFO_S \quad (1.5)$$

Donde:

$\delta$ : densidad relativa del aire.

m: constante en función del voltaje de flashover a condiciones ambientales estándar.

$CFO_S$ : voltaje de flashover a condiciones ambientales estándar.

La densidad relativa del aire se calcula a través de la ecuación 1.6:

$$\delta = e^{\frac{-A}{8.6}} \quad (1.6)$$

A: elevación de la subestación en kilómetros.

La constante m se calcula con la ecuación 1.7:

$$m = 1.25 \times \frac{CFO_S}{500 \times S} \left( \frac{CFO_S}{500 \times S} - 0.2 \right) \quad (1.7)$$

Donde:

$CFO_S$ : voltaje de flashover a condiciones ambientales estándar.

S: distancia crítica en metros.

- Valor de cresta del sobrevoltaje de entrada

Corresponde al sobrevoltaje por impulso tipo rayo. Se calcula el valor de cresta de sobrevoltaje de entrada en función de la tolerancia establecida por la polaridad del impulso tipo rayo cuando toma un valor positivo, como se indica en la tabla 1.8:

**Tabla 1.8.** Tolerancias y formas de onda de sobrevoltajes por impulso tipo rayo estándar [7].

Tipo de impulso/Forma de onda nominal	Tipo Relámpago 1.2/ 50 $\mu s$	Sobrevoltajes por conmutación 250/ 2500 $\mu s$
<b>Tolerancias</b>		
<b>Frente</b>	$\pm 30\%$	$\pm 20\%$
<b>Cola</b>	$\pm 20\%$	$\pm 60\%$

Se expresa mediante la ecuación 1.8

$$E = c \times CFO \quad (1.8)$$

Donde:

E: valor de cresta del sobrevoltaje de entrada.

CFO: voltaje de flashover.

c: constante que determina las veces en que el impulso tipo rayo alcanza una polaridad positiva.

- Voltaje soportado por impulso tipo rayo  $V_{3-E}$

Para sobrevoltajes por impulso tipo rayo, el voltaje estadístico del aislamiento está relacionado con el voltaje de flashover, se aclara que para obtener un voltaje estadístico

soportado adecuado se debe asumir que este voltaje será igual a 3 veces la desviación estándar y que dicho valor debe estar por debajo del voltaje de flashover [7], como se muestra en la ecuación 1.9.

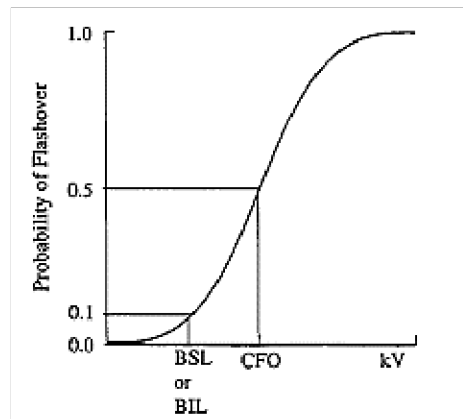
$$V_{3-E} = CFO \times \left[ 1 - 3 \frac{\sigma_f}{CFO} \right] \quad (1.9)$$

Donde:

CFO: voltaje de flashover.

$\frac{\sigma_f}{CFO}$ : coeficiente de variación.

La aplicación del CFO al aislamiento es una probabilidad del 50% el sobrevoltaje máximo del sistema como se indica en la figura 1.7, el coeficiente de variación tiene un rango de valores entre el 5 y 10%, el valor de 10% es recomendado para líneas de transmisión y el 7% para aplicación en subestaciones.



**Figura 1.7.** Distribución gaussiana acumulada de la Soportabilidad del aislamiento [7].

En esta etapa se tiene como resultado valores para los siguientes sobrevoltajes más representativos en sistemas tipo I:

- Sobrevoltaje a frecuencia industrial (fase-tierra y fase-fase).
- Sobrevoltaje por impulso tipo rayo (fase-tierra y fase-fase).

## **Etapa 2: Cálculo de los voltajes soportados por los elementos del sistema.**

### **Conceptos básicos**

Para el desarrollo de esta etapa es necesario introducir los siguientes conceptos:

- Voltaje máximo de operación continua (MCOV): es el valor máximo RMS del voltaje a frecuencia industrial, que puede aparecer continuamente en los terminales del pararrayos [10].
- Tasa de fallas (BFR): está definida como el número de descargas atmosféricas que caen en la torre o el cable de guarda de una línea de transmisión, se expresa en unidades de fallas por cada 100 kilómetros y por año.

### **Procedimiento**

Se calcula el voltaje soportado por el pararrayos y transformador:

a) *En el pararrayos*

El voltaje soportado por el pararrayos está definido por los cálculos que se detallan en los siguientes pasos:

#### **Pasos:**

1) Determinar el MCOV

Se determina el máximo voltaje de operación continuo o permanente del pararrayos en base a la Tabla 1: Características de los pararrayos de clase intermedia y de estación en la norma IEEE Std C62.22-1991 [10], como se puede observar en el ANEXO I, se debe escoger el valor de MCOV relacionado con el voltaje máximo del sistema.

2) Encontrar los voltajes máximos de descarga

Los voltajes máximos de descarga son el resultado de las pruebas a las cuales son sometidos los pararrayos, estos voltajes son medidos a un tiempo de 0.5  $\mu$ s y 8/20  $\mu$ s para soportar una corriente desde 1.5 hasta 40 [kA], para sistemas tipo I el estudio se limita a corrientes de 5 y 10 [kA].

En el ANEXO II se encuentra la tabla 16.4 de la referencia [11], que indica los valores de voltaje máximos de pararrayos para ensayos a diferentes niveles de corriente y tiempo, se escoge los voltajes máximos de descarga y se recomienda plantear la siguiente tabla (Tabla 1.9) para cálculos posteriores:

**Tabla 1.9.** Características del voltaje de descarga y corriente del pararrayos.

<b>Tiempo [<math>\mu</math>s]</b>	<b>Voltaje de descarga <math>E_A</math> [kV]</b>	<b>Corriente del pararrayos <math>I_A</math> [kA]</b>
0.5	$E_{A1}$	10
8/20	$E_{A2}$	10

8/20	$E_{A3}$	5
------	----------	---

Como se puede observar en la tabla anterior (tabla 1.9), no hay un valor de voltaje de descarga específico a 0.5  $\mu$ s para una corriente de descarga de 5 [kA], para seleccionar el voltaje de descarga adecuado se debe encontrar la relación que existe entre el voltaje máximo de descarga a un tiempo de ensayo de 0.5  $\mu$ s y al tiempo de 8/20  $\mu$ s, la operación se detalla a continuación en la ecuación 1.10:

$$E_A' = \frac{E_{A1}}{E_{A2}} \quad (1.10)$$

Donde:

$E_{A1}$ : voltaje máximo de descarga del pararrayos con un tiempo de ensayo de 0.5  $\mu$ s y corriente de descarga de 10 [kA].

$E_{A2}$ : voltaje máximo de descarga del pararrayos con un tiempo de ensayo de 8/20  $\mu$ s y corriente de descarga de 10 [kA].

La operación permite determinar que el voltaje de descarga a un tiempo de 0.5  $\mu$ s es aproximadamente un porcentaje más alto que el voltaje de descarga para un tiempo superior a los 8/20  $\mu$ s.

- 3) Calcular el voltaje de descarga a un tiempo de 0.5  $\mu$ s para una corriente de 5 [kA]

En base a lo mencionado en el paso anterior se realiza la operación con la ecuación 1.11.

$$E_{A4} = E_A' \times E_{A3} \quad (1.11)$$

Donde:

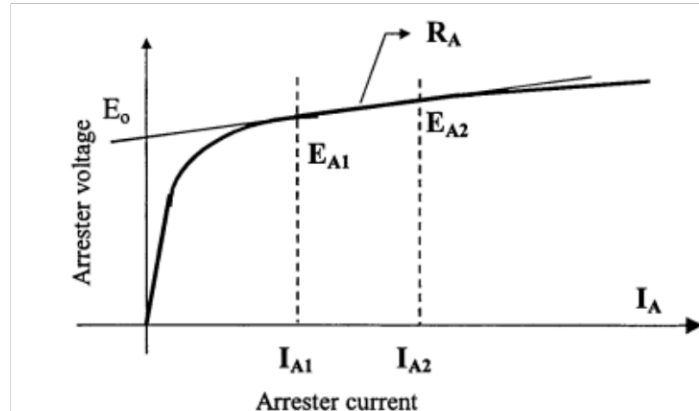
$E_A'$ : porcentaje de incremento del voltaje máximo de descarga del pararrayos operando a un tiempo de ensayo de 0.5  $\mu$ s y corriente de descarga de 5 [kA]

$E_{A3}$ : voltaje máximo de descarga del pararrayos operando a un tiempo de ensayo de 8/20  $\mu$ s y corriente de descarga de 5 [kA].

- 4) Calcular la resistencia del pararrayos

Con los valores calculados en pasos anteriores y en base a la figura 1.8 que representa la resistencia del pararrayos en un intervalo de dos voltajes de descarga, para una corriente de 5 y 10 [kA]. El cálculo de la resistencia del pararrayos se lo realiza con la ecuación 1.12:





**Figura 1.8.** Características del voltaje del pararrayos en función de su corriente en base a la norma IEEE Std 1313.2 [3].

$$R_A = \frac{E_{A1} - E_{A2}}{I_{A1} - I_{A2}} \quad (1.12)$$

Donde:

$E_{A4}$ : voltaje máximo de descarga del pararrayos a un tiempo de ensayo de 5  $\mu$ s y corriente de descarga de 5 [kA].

$E_{A1}$ : voltaje máximo de descarga del pararrayos a un tiempo de ensayo de 5  $\mu$ s y corriente de descarga de 10 [kA].

$I_{A2}$ : corriente de descarga del pararrayos correspondiente al voltaje  $E_{A4}$ .

$I_{A1}$ : corriente de descarga del pararrayos correspondiente al voltaje  $E_{A1}$ .

5) Calcular el voltaje inicial de operación del pararrayos

Se utiliza una corriente de 5 [kA] para calcular el valor del voltaje de arranque o inicial con la que opera el pararrayos, en base a la ecuación 1.13.

$$E_0 = E_d - I_A R_A \quad (1.13)$$

Donde:

$E_d$ : Voltaje de descarga.

$I_A$ : corriente del pararrayos.

$R_A$ : resistencia del pararrayos.

6) Calcular la corriente del pararrayos

En este paso se debe considerar que la subestación cuente con un transformador con capacitor a tierra. Se representa el circuito en la figura 1.9, aplicando mallas, se puede

visualizar que la corriente del pararrayos es la corriente que ingresa al transformador, la norma IEEE Std.1313-2 plantea la ecuación 1.14 [8].

$$I_A = 1.6 \times \frac{\frac{2E}{n} - E_A}{\frac{Z}{n}} \quad (1.14)$$

Donde:

E: sobrevoltaje por impulso tipo rayo.

E<sub>A</sub>: voltaje soportado por el pararrayos.

n: número de líneas.

Z: impedancia característica de la línea.

Se reemplaza la ecuación 1.13 en la ecuación 1.14, obteniendo como resultado la ecuación 1.15 para determinar la corriente del pararrayos.

$$I_A = 1.6 \frac{\frac{2E}{n} - E_O - V_{PF}}{\frac{Z}{n} + R_A} \quad (1.15)$$

Donde:

V<sub>PF</sub>: sobrevoltaje a frecuencia industrial.

E<sub>O</sub>: voltaje inicial de operación del pararrayos.

#### 7) Calcular el voltaje soportado por el pararrayos

Se despeja de la ecuación 1.13 el voltaje descarga y se vuelve a calcular el valor de este voltaje con la corriente del pararrayos calculada en el paso 6.

$$E_d = E_0 + I_A R_A \quad (1.16)$$

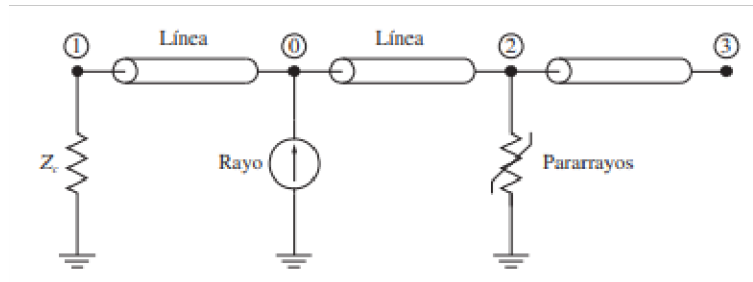
Se calcula el voltaje soportado por el pararrayos con la ecuación 1.17, esta ecuación se describe en el circuito de la figura 1.9, en donde se realiza una malla para el cálculo correspondiente del voltaje que cae en el pararrayos:

$$E_A = E_d + V_{PF} \quad (1.17)$$

Donde:

$E_d$ : voltaje de descarga.

$V_{PF}$ : sobrevoltaje a frecuencia industrial



**Figura 1.9.** Circuito equivalente del sistema pararrayos-transformador [3].

La malla está delimitada por los voltajes en los nodos 1, 0, 2 y 3. El voltaje a frecuencia industrial calculado en la etapa 1 en la entrada de la línea (nodo 1), luego el voltaje en el nodo 0-2 que corresponde al voltaje de descarga y en el nodo 2 el voltaje en los terminales del pararrayos.

Además, el voltaje soportado por el pararrayos del sistema debe cumplir con las siguientes condiciones en base a lo calculado en la etapa 1:

- Para voltajes fase-tierra: si actúa el pararrayos, el sobrevoltaje máximo del sistema debe ser igual al nivel de protección del pararrayos.
- Para voltajes fase-fase: el sobrevoltaje máximo del sistema debe ser menor al valor de dos veces el nivel de protección del pararrayos y del valor calculado en función de la distribución de probabilidad de sobrevoltajes fase-fase, sin considerar el pararrayos.

*b) En el transformador*

Para el cálculo del voltaje soportado por el transformador se debe seguir los siguientes pasos:

Pasos:

- 1) Determinar la distancia a la descarga disruptiva:

La distancia a la descarga disruptiva se mide en kilómetros, está definida por el criterio de confiabilidad de duración del aislamiento, la tasa de falla del sistema y el tipo de circuito, como se indica en la ecuación 1.18:

$$d = \frac{1}{n \times (MTBF) \times (BFR)} \quad (1.18)$$

Donde:

MTBF: criterio de confiabilidad de duración del aislamiento.

BFR: tasa de falla.

n: número de conductores del sistema.

2) Definir la inclinación del flashover

La inclinación del flashover está medida en [kV/  $\mu$ s]. Este valor depende de la constante de corona y la distancia del flashover como se indica en la ecuación 1.19:

$$S = \frac{K_s}{d} \quad (1.19)$$

Donde:

$K_s$ : constante de corona.

S: inclinación de flashover.

d: distancia a la descarga disruptiva.

El valor que se debe escoger de la constante de corona depende del calibre y tipo de conductor, la norma IEEE Std 1313.2 sugiere el valor de esta constante en base al número de conductores que tenga el sistema, como se muestra en la tabla 1.10:

**Tabla 1.10.** Valores sugeridos de la constante de corona por la IEEE Std 1313.2. [5]

Conductor	$K_s$ [kV-km/ $\mu$ s]
Un Conductor	700
Haz de dos conductores	1000
Haz de 3 o 4 conductores	1700
Haz de 6u 8 conductores	2500

3) Calcular el voltaje soportado por el transformador

El voltaje soportado por el transformador según lo determina la norma IEEE Std 1313.2 debe ser mayor al voltaje soportado por el pararrayos, ya que considera la constante de tiempo de descarga y el número de líneas del circuito, cuyo valor incrementa con un mayor número de líneas [8] .

El voltaje soportado por el transformador se calcula mediante la ecuación 1.20

$$E_T = \left(1 + \frac{A}{1 + \frac{B}{K1}}\right) \times E_A \quad (1.20)$$

Donde:

A: constante definida por el número de líneas del circuito en la tabla 1.11.

B: constante definida por el número de líneas del circuito en la tabla 1.11.

K1: constante de tiempo definida por el tiempo de descarga y voltaje soportado por el pararrayos, se define en la ecuación 1.21.

E<sub>A</sub>: voltaje soportado por el pararrayos.

**Tabla 1.11.** Constantes A y B [8].

Número de líneas	A	B
1	1	0.14
2	0.98	0.16
3	0.84	0.18
4	0.68	0.25

$$K1 = \frac{S(T_T + T_A)}{E_A} \quad (1.21)$$

Donde:

T<sub>T</sub>: tiempo de viaje del sobrevoltaje entre la conexión del pararrayos y el transformador.

T<sub>A</sub>: tiempo de viaje del sobrevoltaje por impulso tipo rayo al pararrayos.

S: inclinación del flashover.

- 4) Calcular el voltaje a tierra en los terminales del transformador (bushing del transformador)

En base al circuito de la figura 1.10, con el nodo 3 se forma una malla que permite determinar el voltaje a tierra en los terminales del transformador, se lo calcula mediante la ecuación 1.22 [8]:

$$E_t = E_T - V_{PF} \quad (1.22)$$

Donde:

$E_T$ : voltaje soportado por el transformador.

$V_{PF}$ : sobrevoltaje a frecuencia industrial.

### **Etapa 3: Calcular y seleccionar niveles de aislamiento estándar**

#### **Conceptos básicos**

Para el desarrollo de esta etapa es necesario introducir los siguientes conceptos:

- BIL: es el nivel básico de aislamiento por impulso tipo rayo. Se define como el valor de cresta de un impulso tipo rayo, para el cual el aislamiento no presenta una descarga disruptiva frente a descargas atmosféricas, se aplica en aislamiento no regenerables [1].
- Cadena de aisladores: es el conjunto de elementos formados por material aislante, que se encuentran en las líneas de transmisión y permiten el paso de corriente por los conductores. La cadena de aisladores es móvil, se mueve alrededor de la rótula que es la unión al soporte [12].
- Rigidez Dieléctrica: es el máximo voltaje por unidad de longitud, al cual los materiales dieléctricos o aislantes se pueden perforar por los sobrevoltajes representativos en el sistema y se pueden perder las propiedades aislantes, depende de la forma de onda del sobrevoltaje (frente, valor de cresta, cola), de la polaridad y de las condiciones ambientales al tratarse de un aislamiento externo. Se mide en kV/m y es la relación entre el voltaje soportado y la longitud de conexión [13].

## Procedimiento

En esta etapa se calcula y selecciona el nivel de aislamiento para los equipos del sistema y seleccionar los voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo, calculados en las etapas 1 y 2:

a) *Calcular el nivel de aislamiento de los equipos del sistema.*

La norma recomienda que, para cualquier equipo, se deben utilizar las ecuaciones 1.23 y 1.24, bajo las condiciones que el voltaje del disyuntor sea mayor o menor a 1.15 el voltaje de descarga. Por recomendación de la norma IEEE Std 1313.2 [8] se considera un factor de seguridad del 15% tanto para aislamiento interno como externo.

Caso A:  $\frac{E_b}{E_d} \leq 1.15$

$$BIL = \frac{E_d}{\delta} \quad (1.23)$$

Caso B:  $\frac{E_b}{E_d} \geq 1.15$

$$BIL = \frac{E_d}{1.15\delta} \quad (1.24)$$

Donde:

$E_b$ =voltaje a tierra del disyuntor.

$E_d$ = voltaje de descarga.

$\delta$  = densidad relativa del aire.

Para el transformador, la norma IEEE Std 1313.2 recomienda utilizar la ecuación 1.25, si el tiempo de cresta es menor o igual 3  $\mu$ s.

$$BIL = 1.15 \times \frac{E_t}{1.10} \quad (1.25)$$

Para tiempos de cresta mayor a 3  $\mu$ s se debe utilizar la ecuación 1.26.

$$BIL = 1.15 \times E_t \quad (1.9)$$

Donde:

$E_t$ : Voltaje en los terminales del transformador.

Se puede aplicar las ecuaciones 1.25 y 1.26 para calcular el BIL en el transformador o en los terminales del transformador. Se debe seleccionar los niveles de aislamiento estandarizados, en base a los valores establecidos en la tabla 1.12, descrita a continuación, estos valores son recomendados por la norma IEEE Std C62.82.1 [1].

**Tabla 1.12.** Valores estandarizados del nivel de aislamiento BIL [1].

10, 20, 30, 45, 60, 75, 95, 110, 125, 150, 200, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 825, 850, 900, 950, 975, 1050, 1175, 1300, 1425, 1550, 1675, 1800, 1925, 2050, 2175, 2300, 2425, 2550, 2625, 2675, 2800, 2925, 3050.

b) *Seleccionar los voltajes soportados normalizados.*

Para sobrevoltajes a frecuencia industrial:

La norma IEEE Std 1313.2 establece valores de rigidez dieléctrica de la cadena de aisladores, cuyo voltaje soportado depende del método de ensayo libre de neblina como se muestra en la tabla 1.13. En base a esta tabla se selecciona la rigidez dieléctrica, considerando la severidad y tipo de cadena de aisladores, con este valor se puede seleccionar el nivel de aislamiento adecuado para sobrevoltajes a frecuencia industrial, el valor que se escoja debe ser menor al voltaje soportado calculado.

**Tabla 1.13.** Rigidez dieléctrica de la cadena de aisladores [4].

Clasificación	Severidad [mg/cm <sup>2</sup> ]	Unidad Estándar [kV/m]		Unidades de altas distancias de fuga.
		Cadena I	Cadena V	
<b>Muy ligero</b>	0,03	86,9	98,6	91-99
<b>Ligero</b>	0,06	67,5	82,0	74-88
<b>Moderado</b>	0,10	59,3	74,8	64-82
<b>Pesado</b>	0,40	49,3	66,0	56-73



Para sobrevoltajes por Impulso Tipo Rayo:

Para este tipo de sobrevoltajes al ser de corta duración, en el nivel de aislamiento no influye la contaminación. Se selecciona el aislamiento cuyo valor debe ser un poco mayor al voltaje estadístico soportado calculado en la etapa 1, los valores que se muestran en la tabla 1.14 están medidos en kV y son valores establecidos como resultado de los cálculos de voltajes soportados de baja frecuencia y corta duración según lo indica la norma IEEE Std C62.82.1-2010 [1].

**Tabla 1.14.** Valores estandarizados del nivel de aislamiento para sobrevoltajes por impulso tipo rayo[1].

10, 15, 19, 26, 34, 40, 50, 70, 95, 140, 185, 230, 275, 325, 360, 395, 460, 520, 575, 630, 690, 750, 800, 860, 920, 980, 1040, 1090.

En general para sistemas tipo I, la norma IEEE Std C62.82.1 recomienda los valores referenciales de aislamiento según el nivel máximo de voltaje del sistema, los cuales se presentan en la tabla 1.15.

**Tabla 1.15.** Voltajes estándares para sistemas tipo I  $15 \text{ kV} \leq V_m \leq 242 \text{ kV}$  [1]

<b>Máximo Voltaje del sistema Fase-fase kV, rms</b>	<b>Nivel de aislamiento de impulso tipo rayo BIL kV, cresta</b>	<b>Voltajes soportados de baja frecuencia y corta duración Fase-Tierra kV, rms</b>
15	95	34
	110	
26.2	125	40
	150	50
36.2	150	50
	200	70
48.3	250	95
72.5	250	95
	350	140
121	350	140
	450	185
	550	230
145	450	185
	550	230

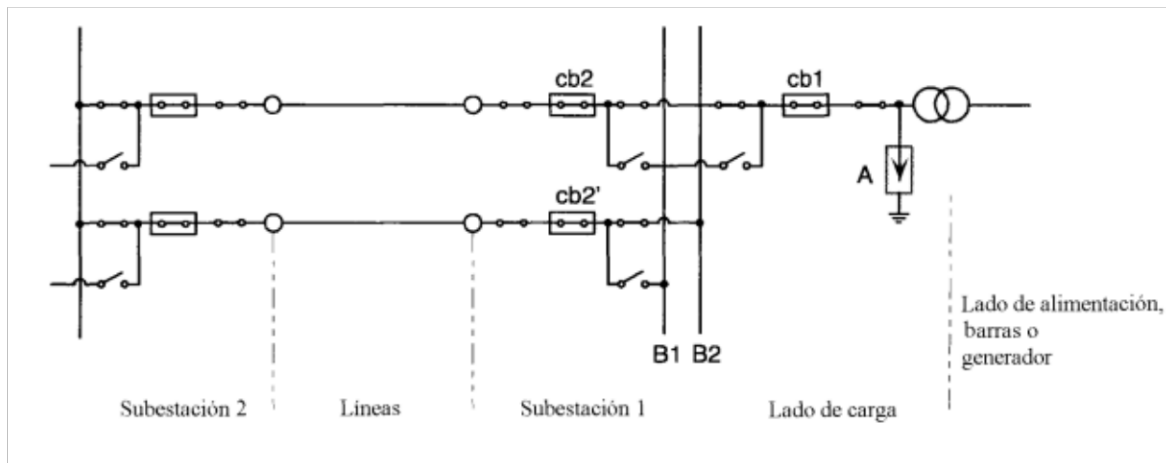
	650	275
169	550	230
	650	275
	750	325
242	650	275
	750	325
	825	360
	900	395
	975	480
	1050	

## 2 METODOLOGÍA

Con el fin de realizar el análisis comparativo de la norma IEC 60071-2 y la norma IEEE Std C62.82.1, en este capítulo se desarrollan dos ejemplos de coordinación de aislamiento para dos modelos teóricos propuestos por las mismas normas, en donde se analiza a detalle las diferencias en cálculos matemáticos que proponen cada uno de los procedimientos. Particularmente para el Trabajo de Integración Curricular, se aplicará el procedimiento descrito en el capítulo 1 sección 1.4.3, establecido por la norma IEEE Std C62.82.1 para determinar niveles adecuados de aislamiento.

### 2.1 EJEMPLO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA UN SISTEMA DE 230 kV

Se realiza la coordinación de aislamiento en un sistema con un voltaje nominal de 230 kV, el estudio realizado es en base a un modelo simplificado como se puede observar en la figura 2.1, el sistema está formado por 2 subestaciones con conexión de neutro rígido a tierra, cuenta con un transformador y un pararrayos conectados a la barra de transferencia de la subestación 1, en donde se va a realizar el estudio de coordinación. Las características del sistema se presentan a continuación, en la tabla 2.1.



**Figura 2.1.** Ejemplo de disposición esquemática de una subestación nueva de 230 kV de la norma IEC 60071.2 [14].

**Tabla 2.1.** Características del Sistema de 230 kV.

Características	Valores
Voltaje Nominal	230 [ kV]
Voltaje Eficaz	242 [kV]

Impedancia de línea	450 $\Omega$
Nivel de contaminación	0.10 [mm/kV]
Tasa de falla [BFR]	1/400 [km/año]
MTBF	400 años
Distancia Aislamiento interno	30 [m]
Distancia Aislamiento externo	60 [m]
Altura de la Torre [h]	1000 [m]
Vano [w]	300 [m]
Longitud del tramo	250 [m]
Cadena de aisladores	Tipo V
Distancia estructura-aislador	3 [m]
Número de líneas	2
Tiempo de viaje del sobrevoltaje entre la conexión del pararrayos y el transformador.	0.02 $\mu$ s
Tiempo de viaje del sobrevoltaje de tipo rayo al pararrayos.	0.02 $\mu$ s
Severidad de ensayo libre de neblina	Ligero
Tipo de neutro	Rígido a Tierra

### 2.1.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE LOS SOBREVOLTAJES DEL SISTEMA DE 230 kV.

En esta etapa se realiza los cálculos de los sobrevoltajes en base a un modelo simplificado, este estudio permite conocer de forma aproximada los parámetros que tienen mayor incidencia en las principales características de los sobrevoltajes representativos del sistema.

Se considera para este ejemplo de cálculo que los sobrevoltajes más representativos en sistemas tipo I son sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo.

Las causas más frecuentes de los sobrevoltajes a frecuencia industrial son por fallas a tierra, o por el contacto de una o más fases, lo que da como resultado un sobrevoltaje a una frecuencia distinta a la de operación del sistema.

La causa más común de los sobrevoltajes por impulso tipo rayo, son en su mayoría por descargas atmosféricas, provocando un transitorio de corta duración que origina no sólo sobrevoltajes sino también puede provocar sobrecorrientes.

Se procede a calcular los sobrevoltajes en base a lo explicado en la sección 1.4.3, etapa 1, de este documento.

a) *Análisis para sobrevoltajes temporales a frecuencia industrial*

Para el cálculo a frecuencia industrial se debe analizar el comportamiento de la onda a frecuencia industrial, por lo tanto lo que primero se calcula es el valor máximo de cresta, que es el valor pico alcanzado por el sobrevoltaje.

- Valor máximo de cresta:

Se debe calcular el valor máximo de cresta de los sobrevoltajes fase-fase y fase tierra, en base a la ecuación 1.1:

*Cálculo de sobrevoltajes Fase-Fase:*

Se toma el voltaje eficaz del sistema que es el valor máximo de voltaje, de la tabla 1.15, el valor que corresponde al sistema de 230 kV es de 242 kV, al que se multiplica por 1.4 debido a que el sistema de este ejemplo cuenta con una conexión de neutro rígido a tierra, este valor está establecido en la tabla 1.6.

$$V_{PF} = 242 \times 1.4 = 338.8 \text{ [kV]}$$

*Cálculo de sobrevoltajes Fase-Tierra:*

El voltaje fase-tierra del sistema se calcula por el tipo de falla que se ha considerado, para este ejemplo al tratarse de una falla monofásica, este valor corresponde a dividir el valor del factor de falla a tierra para raíz de tres.

$$V_{PFT} = \frac{1.4}{\sqrt{3}} \times 242 = 195.6 \text{ [kV]}$$

Una vez calculado el valor máximo de cresta se calcula el voltaje soportado como se explica en la sección 1.4.3 etapa 1.

- Voltaje soportado a frecuencia industrial:

La finalidad de este cálculo es fijar valores mínimos de los voltajes soportados, cuando el sistema se somete a sobrevoltajes temporales.

Se calcula el voltaje soportado en base a la ecuación 1.2:

$$V_{3-VPF} = 338.8 [kV]$$

b) *Análisis para sobrevoltajes por impulso tipo rayo*

Este es otro tipo de sobrevoltaje que se presente comúnmente en la red, el cual puede afectar al aislamiento externo del sistema, se debe analizar el impulso tipo rayo que puede caer en la línea de la subestación.

Para el cálculo se analiza el comportamiento de la onda de sobrevoltajes por impulso tipo rayo, por lo tanto lo que primero se debe calcular es el voltaje de flashover, que consiste en el valor máximo que puede alcanzar este tipo de sobrevoltaje.

- Voltaje de flashover

El ejercicio planteado considera condiciones ambientales estándar, por lo tanto no se realiza el cálculo del CFO tomando en cuenta el cálculo de la densidad relativa del aire.

De la ecuación 1.4, el factor de espaciamento tiene un valor de:

$$k_g = 1.25 + 0.005 \left( \frac{1000}{250} - 6 \right) + 0.25 \left( e^{-\frac{8(300)}{250}} - 0.2 \right)$$

$$k_g = 1.19$$

De la ecuación 1.3, el voltaje de flashover tiene un valor de:

$$CFO = 1.19 \times \frac{3400}{1 + \frac{8}{3}}$$

$$CFO = 1103.5 [kV]$$

En base al CFO se procede a calcular el valor de cresta del sobrevoltaje, que corresponde al valor máximo alcanzado por el impulso tipo rayo :

- Valor de cresta del sobrevoltaje de entrada

Para el cálculo del valor máximo que el sobrevoltaje por impulso tipo rayo alcanza, se debe considerar que el sobrevoltaje es 1.2 veces la polaridad positiva del CFO en el aislamiento de la línea, esto quiere decir que por recomendación de la norma se toma un valor del 20% como tolerancia del frente del rayo, este valor puede cambiar en base a lo establecido en la tabla 1.8, que indica los valores de tolerancia obtenidos mediante ensayos realizados en simulaciones, con los que se puede determinar el tiempo de ocurrencia del rayo que va a entrar en la línea.

Se realiza el cálculo con la ecuación 1.8, cuya constante  $c$  será un valor de 1.2 tal como recomienda la norma IEEE Std 1313.2.

$$E = 1.2 \times (1103.5) = 1324.2 \text{ [kV]}$$

Una vez calculado el valor de cresta, se calcula el voltaje soportado por impulso tipo rayo como se explica en la sección 1.4.3 etapa 1.

- Voltaje soportado por impulso tipo rayo:

La finalidad de este cálculo es fijar valores mínimos de los voltajes soportados cuando el sistema se somete a sobrevoltajes por impulso tipo rayo.

En base a la ecuación 1.9, se considera que el coeficiente de variación sea del 7% según lo recomienda la norma IEEE Std. 1313.2 para aplicación en subestaciones.

$$V_{3-E} = 1324.2 \times [1 - 3(7\%)] = 1046.118 \text{ [kV]}$$

## **2.1.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE LOS VOLTAJES SOPORTADOS POR LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE 230 kV.**

En esta etapa se calcula los valores de voltaje soportados especificados por los elementos del sistema con la finalidad de ajustar o instalar equipos de protección, en esta etapa se puede determinar la robustez del sistema de tal forma que en base a los voltajes soportados por los elementos principales del modelo simplificado, se pueda determinar el aislamiento tanto interno como externo requerido.

### *a) En el pararrayos*

Para el cálculo del voltaje soportado por el pararrayos se deben seguir una serie de pasos que se enumeran a continuación, en base a lo explicado en la sección 1.4.3 del capítulo 1 en este trabajo de integración curricular.

#### Pasos:

- 1) Determinar MCOV

En base a la Tabla 1: Características de los pararrayos de clase intermedia y de estación en la norma IEEE Std C62.22-1991 [10], para el voltaje eficaz del sistema se selecciona un valor de MCOV mínimo de 140 kV, se puede verificar este valor en el Anexo I.

## 2) Voltajes máximos de descarga

De la tabla 16.4 de la referencia [11] se presenta en la tabla 2.2 un resumen de las características del voltaje máximo de descarga, se pueden verificar estos valores en el Anexo II:

**Tabla 2.2.** Características del voltaje del pararrayos según la norma IEEE 62.22-1991 para un sistema de 230 kV [10].

Tiempo [ $\mu$ s]	Voltaje de descarga $E_A$ [kV]	Corriente del pararrayos $I_A$ [kA]
0.5	464	10
8/20	421	10
8/20	404	5

Como se puede observar en la tabla 2.2 no hay un valor de voltaje de descarga específico a 0.5  $\mu$ s para una corriente de descarga de 5 [kA]. Tal y como se indica en la guía mediante la ecuación 1.10, se determina el porcentaje de crecimiento del voltaje de descarga:

$$E_A' = \frac{464[kV]}{421[kV]} = 1.10$$

La división de 464 kV para 421 kV muestra que el voltaje de descarga a un tiempo de 0.5  $\mu$ s es aproximadamente un 10% más alto que el voltaje de descarga para un tiempo superior a los 8/20  $\mu$ s.

## 3) Voltaje de descarga

Se calcula el voltaje de descarga con la ecuación 1.11, para una corriente de 5 [kA] :

$$E_{A2} = (1.10) \times (404) = 444[kV]$$

## 4) Resistencia del pararrayos

Tomando los valores de los pasos anteriores, se calcula la resistencia del pararrayos en base a la ecuación 1.12:

$$R_A = \frac{464 - 444}{10 - 5} = 4 \Omega$$

## 5) Voltaje inicial de operación del pararrayos



Se utiliza una corriente de 5 [kA] para calcular el valor del voltaje de operación inicial, mediante la ecuación 1.13.

$$E_0 = 444 - (5 \times 4) = 424 [kV]$$

6) Corriente del pararrayos

Se calcula mediante la ecuación 1.15:

$$I_A = 1.6 \times \frac{1324.2 - 424 - 338.8}{\frac{450}{2} + 4} = 3.922 [kA] \sim 4 [kA]$$

Ya que el voltaje de descarga fue calculado con una corriente de 5 [kA], se puede considerar este valor para los cálculos posteriores.

7) Voltaje soportado por el pararrayos:

Primero se calcula el voltaje de descarga con la corriente del pararrayos calculada en el paso 6.

Con la ecuación 1.16:

$$E_d = 424 + (5 \times 4) = 444 [kV]$$

Y el voltaje soportado por el pararrayos se calcula con la ecuación 1.17:

$$E_A = 444 + 338.8 = 782.8 [kV]$$

*b) En el transformador*

Para el cálculo del voltaje soportado por el transformador se deben seguir una serie de pasos que se enumeran a continuación, en base a lo explicado en la sección 1.4.3 del capítulo 1 de este documento.

Pasos:

1) Distancia a la descarga disruptiva

En base a la ecuación 1.18.

$$d = \frac{1}{2 \times (1/400) \times 400} = 0.5 [km]$$

La distancia puede incrementar en cada tramo, para el diseño se puede escoger una distancia mayor, por seguridad se puede incrementar de 0.1 a 0.5 kilómetros. Para el

ejercicio se incrementa 0.1 kilómetros a la distancia calculada, por tanto, la distancia a la descarga disruptiva será de 0.6 kilómetros.

### 2) Inclinación del flashover

Para este paso se debe considerar el tipo de circuito que tiene el sistema y determinar el valor de constante de corona. El sistema que corresponde a este ejemplo es de doble circuito, por tanto de la tabla 1.10 se toma como valor de constante de corona 1000 [kV-km/ $\mu$ s].

Se procede a realizar el cálculo en base a la ecuación 1.19.

$$S = \frac{1000}{0.6} = 1666.67 \left[ \frac{kV}{\mu s} \right]$$

### 3) Voltaje soportado por el transformador

Para este cálculo se deben considerar los tiempos de viaje del sobrevoltaje entre la conexión del pararrayos y el transformador y tiempo de viaje del sobrevoltaje por impulso tipo rayo, estos valores son de 0.02  $\mu$ s respectivamente en base a la Tabla 2.1. Se calcula la constante K1 mediante la ecuación 1.21.

De la ecuación 1.21:

$$K1 = \frac{1666.67(0.02 + 0.02)}{782.8} = 0.085$$

En este ejemplo como se puede observar en la Figura 2.1, el sistema es de doble circuito, por lo tanto, de la tabla 1.11 los valores de las constantes A y B son de 0.98 y 0.16 respectivamente. Se reemplazan los valores obtenidos en la ecuación 1.20 para calcular el voltaje soportado por el transformador:

$$E_T = \left( 1 + \frac{0.98}{1 + \frac{0.16}{0.085}} \right) (782.8) = 1048.9 [kV]$$

Se calcula el voltaje a tierra en los terminales del transformador mediante la ecuación 1.22:

$$E_t = 1048.9 - 338.8 = 710.15 [kV]$$

### 2.1.3 ETAPA 3: CALCULAR Y SELECCIONAR LOS NIVELES DE AISLAMIENTO ESTÁNDAR PARA EL SISTEMA DE 230 kV

En esta etapa se procede a calcular los niveles de aislamiento en los equipos del sistema, con la finalidad de encontrar los valores normalizados de aislamiento, el valor seleccionado depende principalmente de la magnitud y frecuencia de los sobrevoltajes que aparecen en el sistema.

En base a la ecuación 1.25, se calcula el nivel de aislamiento por impulso tipo rayo con tiempo de cresta menor a 3 us para el transformador:

$$BIL_T = 1.15 \times \frac{1048.9}{1.10} = 1096.6 [kV]$$

Se aplica la misma ecuación para el bushing del transformador:

$$BIL_t = 1.15 \times \frac{710.15}{1.10} = 742.43 [kV]$$

En base a la ecuación 1.24, se calcula el nivel de aislamiento por impulso tipo rayo para el caso A, donde el voltaje del disyuntor es menor al voltaje de descarga.

La densidad relativa de aire se calcula con la ecuación 1.6:

$$\delta = e^{\frac{-1}{8.6}} = 0.89$$

Por lo tanto, el nivel de aislamiento es igual a:

$$BIL_o = \frac{444}{0.89} = 498.9 [kV]$$

Para el caso de sobrevoltajes a frecuencia industrial, el nivel de aislamiento se determina considerando la rigidez dieléctrica del material aislante que depende de las características de la subestación, bajo un ensayo de neblina ligero con severidad de 0.06 mg/cm<sup>2</sup> y una cadena de aisladores tipo V, de la Tabla 1.13 se escoge una resistencia de aislamiento de 82 [kV/m]. El aislamiento debe ser escogido de tal forma que ninguna perturbación eléctrica con una frecuencia a 60 [Hz] sea mayor a la tolerable por cada uno de los equipos de la subestación, por lo tanto se debe comparar con los voltajes soportados por el pararrayos y transformador calculados en la sección 2.1.2.

Para los sobrevoltajes por impulso tipo rayo, como el valor del sobrevoltaje soportado calculado en la etapa 1 es de aproximadamente 1047 [kV], de la Tabla 1.14 y por

recomendación de la norma IEEE Std 1313.2 se escoge un valor superior, para este caso sería de 1050 [kV].

Una vez completadas las tres etapas, se obtienen los valores de voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo, como se detalla en la Tabla 2.3.

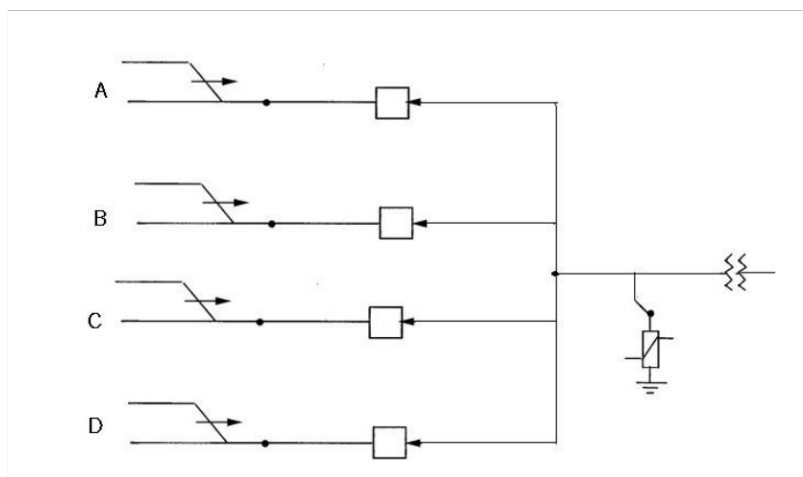
**Tabla 2.3.** Resultados obtenidos de la coordinación de aislamiento para un sistema de 230 kV <sup>4</sup>.

<b>Voltajes Normalizados</b>	<b>Aislamiento requerido [kV]</b>	<b>Aislamiento estándar [kV]</b>
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial $V_{3-VPF}$	339	360
Voltaje soportado por impulso tipo rayo $V_{3-E}$	1047	1050

## 2.2 EJEMPLO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA UN SISTEMA DE 24 kV

El ejemplo de coordinación de aislamiento se realiza en el sistema que se presenta en la figura 2.2, se trata de un sistema de 4 líneas de transmisión con un voltaje nominal de 24 kV con conexión neutro rígido a tierra, la coordinación de aislamiento se realiza en el punto de conexión de las 4 líneas (nodo), el sistema cuenta con un transformador y un pararrayos. Las características del sistema se presentan en la tabla 2.4.

<sup>4</sup> Los resultados presentados en la tabla son en base a un redondeo de decimales al inmediato superior de los cálculos realizados en las 3 etapas para el ejemplo de coordinación de aislamiento, en un sistema de 230 kV.



**Figura 2.2.** Ejemplo de disposición esquemática de un sistema de 24 kV.

**Tabla 2.4.** Características Sistema de 24 kV.

Características	Valores
Voltaje Nominal	24 [ kV]
Voltaje Eficaz	26.2 [kV]
Impedancia de línea	450 $\Omega$
Nivel de contaminación	0.10 [mm/kV]
Tasa de falla [BFR]	1/400 [km/año]
MTBF	400 años
Distancia Aislamiento interno	3 [m]
Distancia Aislamiento externo	5 [m]
Altura de la Torre [h]	1000 [m]
Vano [w]	100 [m]
Longitud del tramo	42 [m]
Cadena de aisladores	Tipo I
Distancia estructura-aislador	30 [cm]
Número de líneas	4
Tiempo de viaje del sobrevoltaje entre la conexión del pararrayos y el transformador.	0,02 $\mu$ s
Tiempo de viaje del sobrevoltaje de tipo rayo al pararrayos.	0,02 $\mu$ s
Severidad de ensayo libre de neblina	Ligero

Tipo de neutro	Rígido a Tierra
----------------	-----------------

### 2.2.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE LOS SOBREVOLTAJES DEL SISTEMA DE 24 kV.

En esta etapa se realiza los cálculos de los sobrevoltajes en base a un modelo simplificado. Este estudio permite conocer de forma aproximada los parámetros que tienen mayor incidencia en las principales características de los sobrevoltajes representativos del sistema.

Se considera para este ejemplo de cálculo que los sobrevoltajes más representativos en sistemas tipo I son sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo.

Las causas más frecuentes de los sobrevoltajes a frecuencia industrial son por fallas a tierra, o por el contacto de una o más fases; lo que da como resultado un sobrevoltaje a una frecuencia distinta a la de operación del sistema.

La causa más común de los sobrevoltajes por impulso tipo rayo, son en su mayoría por descargas atmosféricas, provocando un transitorio de corta duración que origina no sólo sobrevoltajes sino también puede provocar sobrecorrientes.

Se procede a calcular los sobrevoltajes en base a lo explicado en la sección 1.4.3, etapa 1, de este documento.

#### *a) Análisis para sobrevoltajes a frecuencia industrial*

Se debe analizar el comportamiento de la onda a frecuencia industrial, por lo tanto, lo que primero se debe calcular es el valor máximo de cresta, que es el valor pico alcanzado por el sobrevoltaje.

- Valor máximo de cresta:

Se debe calcular el valor máximo de cresta de los sobrevoltajes fase-fase y fase tierra, en base a la ecuación 1.1:

*Cálculo de sobrevoltajes Fase-Fase:*

Se toma el voltaje eficaz del sistema que es el valor máximo de voltaje, en la tabla 1. el valor que corresponde al sistema de 24 kV es de 26.2 kV, al que se multiplica por 1.4

debido a que el sistema de este ejemplo cuenta con una conexión de neutro rígido a tierra, este valor está establecido en la tabla 1.6.

$$V_{PF} = 26.2 \times 1.4 = 36.7 \text{ [kV]}$$

*Cálculo de sobrevoltajes Fase-Tierra:*

El sobrevoltaje fase-tierra del sistema se calcula por el tipo de falla que se ha considerado, para este ejemplo al tratarse de una falla monofásica, este valor corresponde a dividir el valor del factor de falla a tierra para raíz de tres.

$$V_{PFT} = \frac{1.4}{\sqrt{3}} \times 26.2 = 21.17 \text{ [kV]}$$

Una vez calculado el valor máximo de cresta, se calcula el voltaje soportado como se explica en la sección 1.4.3 etapa 1.

- Voltaje soportado a frecuencia industrial:

La finalidad de este cálculo es fijar valores mínimos de los voltajes soportados, cuando el sistema se somete a sobrevoltajes temporales.

Se calcula el voltaje soportado en base a la ecuación 1.2:

$$V_{3-VPF} = 36.7 \text{ [kV]}$$

*b) Análisis para sobrevoltajes por impulso tipo rayo*

Este es otro tipo de sobrevoltaje que se presente comúnmente en la red, el cual puede afectar al aislamiento externo del sistema, se debe analizar el impulso tipo rayo que puede caer en la línea de la subestación.

Para el cálculo se analiza el comportamiento de la onda de sobrevoltajes por impulso tipo rayo, por lo tanto, lo que primero se debe calcular es el voltaje de flashover, que es el valor máximo que puede alcanzar este tipo de sobrevoltaje.

- Voltaje de flashover

El ejercicio planteado considera condiciones ambientales estándar, por lo tanto, no se realiza el cálculo del CFO tomando en cuenta el cálculo de la densidad relativa del aire.

De la ecuación 1.4, el factor de espaciamiento tiene un valor de:

$$k_g = 1.25 + 0.005 \left( \frac{1000}{42} - 6 \right) + 0.25 \left( e^{\frac{-8(100)}{42}} - 0.2 \right)$$

$$k_g = 1.18$$

De la ecuación 1.3, el voltaje de flashover tiene un valor de:

$$CFO = 1.18 \times \frac{3400}{1 + \frac{8}{0.3}}$$

$$CFO = 145.01 [kV]$$

- Valor de cresta del sobrevoltaje de entrada

Para el cálculo del valor máximo que el sobrevoltaje por impulso tipo rayo alcanza, se debe considerar que este sobrevoltaje es 1.2 veces la polaridad positiva del CFO en el aislamiento de la línea, esto quiere decir que por recomendación de la norma se toma un valor del 20% como tolerancia del frente del rayo, este valor puede cambiar en base a lo establecido en la tabla 1.8, que indica los valores de tolerancia obtenidos mediante ensayos realizados en simulaciones, con los que se puede determinar el tiempo de ocurrencia del rayo que va a entrar en la línea.

Se realiza el cálculo con la ecuación 1.8, cuya constante  $c$  será un valor de 1.2 tal como recomienda la norma IEEE Std 1313.2.

$$E = 1.2 (145.01) = 174.012 [kV]$$

Una vez calculado el valor de cresta, se calcula el voltaje soportado por impulso tipo rayo como se explica en la sección 1.4.3 etapa 1.

- Voltaje soportado por impulso tipo rayo:

La finalidad de este cálculo es fijar valores mínimos de los voltajes soportados, cuando el sistema se somete a sobrevoltajes por impulso tipo rayo.

En base a la ecuación 1.9, se considera que el coeficiente de variación sea del 7% según lo recomienda la norma IEEE Std. 1313.2 para subestaciones.

$$V_3 = 145.01 \times [1 - 3(7\%)] = 114.6 [kV]$$

## **2.2.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE LOS VOLTAJES SOPORTADOS POR LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE 24 kV.**

En esta etapa se calcula los valores de voltaje soportados especificados por los elementos del sistema con la finalidad de ajustar o instalar equipos de protección, en esta etapa se puede determinar la robustez del sistema de tal forma que, en base a los voltajes



soportados por los elementos principales del modelo simplificado, se pueda determinar el aislamiento tanto interno como externo requerido.

a) *En el pararrayos*

Para el cálculo del voltaje soportado por el pararrayos se deben seguir una serie de pasos que se enumeran a continuación en base a lo explicado en la sección 1.4.3 del capítulo 1 en este trabajo de integración curricular.

Pasos:

1) Determinar MCOV

En base a la Tabla 1: Características de los pararrayos de clase intermedia y de estación de la norma IEEE Std C62.22-1991 [10], para el voltaje eficaz del sistema se selecciona un valor de MCOV mínimo de 15.3 kV, se puede verificar este valor en el Anexo I.

2) Voltajes máximos de descarga

En la tabla 2.5 se presenta un resumen de las características del voltaje máximo de descarga, estos valores se pueden verificar en el Anexo II:

**Tabla 2.5.** Características del voltaje del pararrayos según la norma IEEE 62.22-1991 para un sistema de 24 kV [10].

Tiempo [ $\mu$ s]	Voltaje de descarga $E_A$ [kV]	Corriente del pararrayos $I_A$ [kA]
0.5	55	10
8/20	50	10
8/20	45	5

Como se puede observar en la tabla 2.5, no hay un valor de voltaje de descarga específico a 0.5  $\mu$ s para una corriente de descarga de 5 [kA]. Tal y como se indica en la guía mediante la ecuación 1.10 se determina el porcentaje de crecimiento del voltaje de descarga :

$$E_A' = \frac{55[kV]}{50[kV]} = 1.1$$

La división de 55 kV para 50 kV muestra que el voltaje de descarga a un tiempo de 0.5  $\mu$ s es aproximadamente un 10% más alto que el voltaje de descarga para un tiempo superior a los 8/20  $\mu$ s.

Se toma el incremento de 1.1 para el cálculo del voltaje de descarga para una corriente de 5 [kA]

3) Voltaje de descarga

Se calcula el voltaje de descarga con la ecuación 1.11:

$$E_{A2} = (1.1)(45) = 49.5[kV]$$

4) Resistencia del pararrayos

Con los valores calculados en los pasos anteriores, se calcula la resistencia del pararrayos en base a la ecuación 1.12:

$$R_A = \frac{55 - 49.5}{10 - 5} = 1.1 \Omega$$

5) Voltaje inicial de operación del pararrayos

Se utiliza una corriente de 5 [kA] para calcular el valor del voltaje de operación inicial, mediante la ecuación 1.13.

$$E_0 = 49.5 - (5 \times 1.1) = 44 [kV]$$

6) Corriente del pararrayos

Se calcula con la ecuación 1.15:

$$I_A = 1.6 \times \frac{174.012 - 44 - 36.7}{\frac{450}{4} + 1.1} = 1.31 [kA]$$

7) Voltaje soportado por el pararrayos:

Primero se calcula el voltaje de descarga con la ecuación 1.16 utilizando la corriente del pararrayos, calculada en el paso 6:

$$E_d = 49.5 + (1.31 \times 1.1) = 50.9 [kV]$$

Y el voltaje soportado por el pararrayos se calcula con la ecuación 1.17:

$$E_A = 50.9 + 36.7 = 87.6 [kV]$$

b) *En el transformador*

Para el cálculo del voltaje soportado por el transformador, se deben seguir una serie de pasos que se enumeran a continuación en base a lo explicado en la sección 1.4.4.

Pasos:

1) Distancia a la descarga disruptiva

En base a la ecuación 1.18.

$$d = \frac{1}{4 \times (1/400) \times 400} = 0.25[km]$$

La distancia puede incrementar en cada tramo, para el diseño se puede escoger una distancia mayor, por seguridad puede ser de 0.1 a 0.5 kilómetros. Para el ejercicio se incrementa 0.1 kilómetros a la distancia calculada, por lo que la distancia a la descarga disruptiva será de 0.35 kilómetros.

2) Inclinación del flashover

Para este paso se debe considerar el tipo de circuito que tiene el sistema y determinar el valor de constante de corona. El sistema que corresponde a este ejemplo cuenta con 4 líneas de transmisión, por tanto de la tabla 1.10 se toma como valor de constante de corona 1700 [kV-km/ $\mu$ s].

Se procede a realizar el cálculo en base a la ecuación 1.19.

$$S = \frac{1700}{0.35} = 4857.2 \left[ \frac{kV}{\mu s} \right]$$

3) Voltaje soportado por el transformador

Para este cálculo se consideran los tiempos de viaje del sobrevoltaje entre la conexión del pararrayos y el transformador y tiempo de viaje del sobrevoltaje por impulso tipo rayo, estos valores son de 0.02  $\mu$ s respectivamente en base a la tabla 2.1. Se calcula la constante K1 con la ecuación 1.21

De la ecuación 1.21:

$$K1 = \frac{4857.2 \times (0.02 + 0.02)}{87.6} = 2.21$$

En este ejemplo como se puede observar en la figura 2.2 se tiene un sistema de 4 líneas, por lo tanto de la tabla 1.11 los valores de las constantes A y B serán de 0.68 y 0.25 respectivamente.

Se reemplazan los valores obtenidos en la ecuación 1.20, para calcular el voltaje soportado por el transformador:

$$E_T = \left( 1 + \frac{0.68}{1 + \frac{0.25}{2.21}} \right) (87.2) = 140.5 \text{ [kV]}$$

Se calcula el voltaje a tierra en los terminales del transformador con la ecuación 1.22:

$$E_t = 140.5 - 36.7 = 103.8 \text{ [kV]}$$

### 2.2.3 ETAPA 3: CALCULAR Y SELECCIONAR LOS NIVELES DE AISLAMIENTO ESTÁNDAR PARA EL SISTEMA DE 24 KV.

En esta etapa se procede a calcular los niveles de aislamiento en los equipos del sistema, con la finalidad de encontrar los valores normalizados de aislamiento, el valor seleccionado depende principalmente de la magnitud y frecuencia de los sobrevoltajes que aparecen en el sistema.

En base a la ecuación 1.25, se calcula el nivel de aislamiento por impulso tipo rayo con tiempo de cresta menor a 3 us para el transformador:

$$BIL_T = 1.15 \times \frac{140.5}{1.10} = 146.9 \text{ [kV]}$$

Se aplica la misma ecuación para el bushing del transformador:

$$BIL_t = 1.15 \times \frac{103.8}{1.10} = 108.5 \text{ [kV]}$$

En base a la ecuación 1.23 se calcula el nivel de aislamiento de impulso tipo rayo para el caso A, donde se asume que el voltaje del disyuntor es menor a 1.15 el voltaje de descarga.

La densidad relativa de aire que se calcula mediante la ecuación 1.6:

$$\delta = e^{\frac{-1}{8.6}} = 0.89$$

Ya conocido el voltaje de descarga y la densidad relativa del aire, el nivel de aislamiento para otros equipos del sistema es igual a:

$$BIL_o = \frac{50.9}{0.89} = 57.19 \text{ [kV]}$$

Para el caso de sobrevoltajes a frecuencia industrial, el nivel de aislamiento se determina considerando la rigidez dieléctrica del material aislante que depende de las características de la subestación, bajo un ensayo de neblina ligero con severidad de 0.06 mg/cm<sup>2</sup> y una cadena de aisladores tipo I, de la Tabla 1.13 se escoge una resistencia de aislamiento de 67.5 [kV/m]. El aislamiento debe ser escogido de tal forma que ninguna perturbación

eléctrica con una frecuencia a 60 [Hz] sea mayor a la tolerable por cada uno de los equipos de la subestación, por lo tanto se debe comparar con los voltajes soportados por el pararrayos y transformador calculados en la sección 2.2.2.

Para los sobrevoltajes por impulso tipo rayo, como el valor del voltaje soportado calculado en la etapa 1 es de aproximadamente 115 [kV], de la Tabla 1.14 y por recomendación de la norma IEEE Std 1313.2 se escoge un valor superior, para este caso sería de: 125 [kV].

Una vez completadas las tres etapas, se obtienen los valores de voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo, como se detalla en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6.** Resultados obtenidos de la coordinación de aislamiento para un sistema de 24 kV<sup>5</sup>.

<b>Voltajes normalizados</b>	<b>Nivel de aislamiento requerido [kV]</b>	<b>Nivel de aislamiento estándar [kV]</b>
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial $V_{3-VPF}$	37	50
Voltaje soportado por impulso tipo rayo $V_{3-E}$	115	125

---

<sup>5</sup> Los resultados presentados en la tabla son en base a un redondeo de decimales al inmediato superior de los cálculos realizados en las 3 etapas para el ejemplo de coordinación de aislamiento, en un sistema de 24 kV.

## **3 ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **3.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO CON LA NORMA IEEE Std C62.82.1**

Una vez realizados los cálculos de las 3 etapas, bajo lo establecido en la norma IEEE Std C62.82.1, se analiza la selección del nivel de aislamiento del sistema y voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial, tanto para aislamientos internos como externos.

#### **3.1.1 EJEMPLO 1: SISTEMA DE 230 kV**

La selección de los valores normalizados de voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo se realiza tomando el valor del nivel de aislamiento requerido por los equipos del sistema calculados en la sección 2.1.2, luego se indica para cada uno el nivel de aislamiento estándar. Estos valores deben ser tomados de la Tabla 1.12 y Tabla 1.14, tomando como criterio la selección de un valor mayor al requerido, con lo que se obtendrá cierto grado de seguridad en el desempeño del aislamiento.

En base a lo ya mencionado, el nivel de aislamiento seleccionado como se indica en la Tabla 3.1, depende de las siguientes consideraciones:

- Para la selección del nivel de aislamiento estándar del transformador se considera, tal como se establece en la tabla 1.15, un nivel de aislamiento 1050 kV. Por otra parte si el voltaje del sistema es excedido, los devanados del transformador podrán estar provistos de derivaciones para voltajes por encima del valor del voltaje nominal, sin incrementar el nivel básico de aislamiento (BIL) seleccionado [15].
- El nivel de aislamiento seleccionado del bushing del transformador se escoge en base al requerido, que es de 750 kV. Este valor da la seguridad de un buen aislamiento, ya que es mayor a su voltaje soportado.
- Para el caso del pararrayos a pesar de que el nivel de aislamiento requerido de 500 kV, el aislamiento seleccionado deber ser mayor al voltaje soportado, que es de 783 kV por motivos de seguridad, por lo tanto, se escoge un aislamiento de 825 kV.

**Tabla 3.1.** Selección del nivel de aislamiento para los elementos del sistema de 230 kV.

<b>Equipo</b>	<b>Voltaje soportado por los equipos del sistema [kV]</b>	<b>Nivel de aislamiento requerido [kV]</b>	<b>Nivel de aislamiento estándar [kV]</b>	<b>Nivel de aislamiento seleccionado [kV]</b>
Transformador $E_T$	1050	1097	1175	1050
Bushing del transformador $E_t$	711	743	750	750
Pararrayos $E_A$	783	500	550	825

Se debe escoger un mismo nivel de aislamiento para todos los equipos del sistema, en la Tabla 3.4 se puede visualizar que el voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial es de 360 kV y por impulso tipo rayo de 1050 kV, esto corresponde al valor máximo de voltaje que no puede ser excedido, por lo tanto, de forma general estos niveles de aislamiento serán requeridos para todos los equipos del sistema del ejemplo 2.

**Tabla 3.2.** Resultados del nivel de aislamiento normalizado según la norma IEEE Std C62.82.1 para un sistema de 230 kV.

<b>Tipo de voltaje normalizado</b>	<b>Aislamiento interno y externo [kV]</b>
<b>Máximo Voltaje del sistema</b>	242
<b>Voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial</b>	360
<b>Voltaje de soportabilidad por impulso tipo rayo</b>	1050

### 3.1.2 EJEMPLO 2: SISTEMA DE 24 kV

La selección de los valores normalizados de voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo se realiza tomando el valor del nivel de aislamiento requerido por los equipos del sistema calculados en la sección 2.1.2, luego se indica para cada uno el nivel de aislamiento estándar, tal como se describió en el ejemplo anterior.

En base a lo ya mencionado, el nivel de aislamiento seleccionado para este sistema como se indica en la Tabla 3.3, depende de las siguientes consideraciones:

- El nivel de aislamiento estándar del transformador es de 150 kV. Este valor está dentro del rango establecido en la tabla 1.15, que indica que el valor máximo de nivel de aislamiento a impulso tipo rayo para el sistema con un máximo voltaje de 26.2 kV debe ser de 150 kV, por lo tanto, se selecciona este valor.
- El nivel de aislamiento del transformador se escoge en base al requerido que es de 110 kV, este valor da la seguridad de un buen aislamiento, ya que es mayor al voltaje soportado.
- Para el caso del pararrayos, a pesar de que el nivel de aislamiento requerido es de 60 kV, el aislamiento seleccionado deber ser mayor al voltaje soportado que es de 88 kV, por motivos de seguridad y dado que para un sistema con un máximo voltaje de 26.2 kV como se indica en la tabla 1.15, el nivel mínimo de aislamiento debe ser de 125 kV.

**Tabla 3.3.** Selección del nivel de aislamiento para los elementos del sistema de 24 kV.

Equipo	Voltaje soportado por los equipos del sistema [kV]	Nivel de aislamiento requerido [kV]	Nivel de aislamiento estándar [kV]	Nivel de aislamiento seleccionado [kV]
Transformador $E_T$	141	147	150	150
Bushing del transformador $E_t$	104	109	110	110
Pararrayos	88	57	60	125



$E_A$				
-------	--	--	--	--

Se debe escoger un mismo nivel de aislamiento para todos los equipos del sistema, en la Tabla 3.4 se puede visualizar que el voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial es de 50 kV y por impulso tipo rayo de 125 kV, esto corresponde al valor máximo de voltaje que no puede ser excedido, por lo tanto, de forma general estos niveles de aislamiento serán requeridos para todos los equipos del sistema del ejemplo 2.

**Tabla 3.4.** Resultados del nivel de aislamiento normalizado según la norma IEEE Std C62.82.1 para un sistema de 24 kV.

<b>Tipo de voltaje normalizado</b>	<b>Aislamiento interno y externo [kV]</b>
<b>Máximo Voltaje del sistema</b>	26.2
<b>Voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial</b>	50
<b>Voltaje de soportabilidad por impulso tipo rayo</b>	125

### **3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS NORMAS IEEE STD. C62.82.1 Y LA NORMA IEC 60071-2**

Se realiza la comparación entre las normas IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2, mediante el análisis de su metodología, cálculo de sobrevoltajes, factores, resultados obtenidos de los casos teóricos analizados y la revisión de la bibliografía de [1] [2] [8] [14] [16]. En las Tablas 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8, se identifican las diferencias y similitudes que existen entre estas normas, las cuales se describen a continuación.

#### **3.2.1 COMPARACIÓN DEL PROCEDIMIENTO GENERAL Y CARACTERÍSTICAS PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LAS NORMAS IEEE STD C.62.82.1 E IEC 60071-2**

Las principales características y procedimiento para la coordinación de aislamiento según la norma IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 se detallan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Procedimiento general y características de las normas IEEE Std C.62.82.1 e IEC 60071-2.

<b>Características/ Procedimiento</b>	<b>Según la norma IEEE Std C62.82.1</b>	<b>Según la norma IEC 60071-2</b>
Límites de voltajes para cada tipo de sistema	Sistemas tipo I: 15 kV a 242 kV. Sistemas tipo II: mayores 242 kV.	Sistemas tipo I: 1 kV a 245 kV. Sistemas tipo II: mayores 245 kV.
Sobrevoltajes representativos en sistemas tipo I y sus principales causas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrevoltajes a frecuencia industrial, originados por fallas monofásicas.</li> <li>• Sobrevoltajes por impulso tipo rayo, originados por descargas atmosféricas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrevoltajes a frecuencia industrial de corta duración, originados por fallas a tierra y pérdida de carga.</li> <li>• Sobrevoltajes por impulso tipo rayo, originados por descargas atmosféricas.</li> </ul>
Voltajes soportados	Son voltajes normalizados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo seleccionados de la tabla 1 de la norma IEEE Std C62.82.1-2010, que dependen del voltaje del sistema.	Son voltajes normalizados a frecuencia industrial de corta duración y por impulso tipo rayo seleccionados de la tabla 2 de la norma IEC 60071-1, que dependen del voltaje del sistema.
Métodos de coordinación de aislamiento	Emplea el método determinístico y estadístico	Emplea el método determinístico y estadístico.
Etapas de la coordinación de aislamiento	<p>Tiene 3 etapas fundamentales:</p> <p>Etapa 1: Se calcula los sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo.</p> <p>Etapa 2: Se calcula los voltajes soportados por los equipos del sistema.</p>	<p>Tiene 4 etapas fundamentales:</p> <p>Etapa 1: Se calcula los sobrevoltajes representativos como los sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo.</p> <p>Etapa 2: Se calcula los voltajes soportados de coordinación.</p> <p>Etapa 3: Se calcula los voltajes soportados</p>

	Etapa 3: Se calcula y selecciona los niveles de aislamiento estándar.	requeridos por los elementos del sistema. Etapa 4: Se selecciona el voltaje soportado normalizado.
Nomenclatura utilizada para determinar los voltajes en la coordinación de aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrevoltaje a frecuencia industrial (<math>V_{PF}</math>): se define como el valor máximo de cresta que alcanza el voltaje cuando ocurre una falla.</li> <li>• Sobrevoltaje por impulso tipo rayo (E): se define como el valor crítico de flashover que alcanza el voltaje de entrada por descargas atmosféricas</li> <li>• Voltaje soportado (<math>V_3</math>): se determinan a partir del resultado de los sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo.</li> <li>• Voltajes soportados especificados por los equipos del sistema: son los voltajes calculados que pueden soportar equipos como transformadores y pararrayos (elementos representativos de la subestación) ante la presencia de un sobrevoltaje, se calculan con la finalidad de ajustar o instalar equipos de protección.</li> <li>• Nivel básico de aislamiento a impulso tipo rayo (BIL): es el valor de cresta que alcanza un impulso de tipo rayo que</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrevoltajes representativos (Urp): son sobrevoltajes que afectan al aislamiento de igual forma que los otros sobrevoltajes que pueden aparecer en el sistema.</li> <li>• Voltaje de coordinación (Ucw): es el voltaje soportado por los equipos, cuya característica es cumplir con las condiciones de servicio a las que fueron diseñados.</li> <li>• Voltaje requerido (Urw): es el voltaje normalizado a condiciones ambientales reales.</li> <li>• Nivel de aislamiento (Uw): es el aislamiento estandarizado para los equipos.</li> </ul>

	determina la soportabilidad del voltaje del sistema frente descargas atmosféricas.	
--	--	--

De la tabla anterior (Tabla 3.5) se puede identificar pequeñas diferencias en los rangos de clasificación de los sistemas tipo I y II que manejan las normas.

En lo que respecta a los sobrevoltajes utilizados para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I, ambas normas analizan sobrevoltajes a frecuencia industrial provocados por fallas monofásicas valoradas a través del factor de falla a tierra y sobrevoltajes por impulso tipo rayo a causa de descargas atmosféricas, estos son lo más representativos en sistemas tipo I. Es importante mencionar que con la norma IEC 60071-2 también se pueden realizar cálculos de sobrevoltajes de frente lento como parte del procedimiento, pero deben ser convertidos por medio de ecuaciones a voltajes normalizados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo.

Otra característica importante de las normas IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 es el método utilizado para la coordinación de aislamiento, los métodos de coordinación de aislamiento dependen de las condiciones y datos relevantes que se tenga del sistema en donde se vaya a realizar el estudio, la norma IEEE utiliza el método determinístico para el cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial por fallas empleando el factor k y el método estadístico para el cálculo de sobrevoltajes por impulso tipo rayo, la norma IEC de igual forma para estos cálculos emplea el método estadístico y determinístico.

En la misma tabla se puede identificar el procedimiento que se debe seguir para la coordinación de aislamiento según la norma IEEE Std C 62.82.1, esta considera tres etapas:

- Etapa 1: Cálculo de los sobrevoltajes representativos para sistemas tipo I, se identifica y calcula los sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo;
- Etapa 2: Cálculo de los voltajes soportados por los equipos del sistema, al tratarse de modelos simplificados como los ejemplos presentados en este trabajo, se toma en cuenta únicamente el aislamiento para el transformador y pararrayos.
- Etapa 3: Cálculo del nivel aislamiento para los equipos del sistema y selección de valores normalizados para los voltajes soportados del sistema.

En cambio, para la norma IEC 60071-2 se deben considerar las siguientes 4 etapas:

- Etapa 1: Cálculo de los sobrevoltajes representativos en sistemas tipo I;
- Etapa 2: Cálculo de los sobrevoltajes de coordinación, se obtiene con la multiplicación de los sobrevoltajes representativos por el factor de coordinación que permita identificar la diferencia entre el voltaje a condiciones estándar de operación y voltajes a condiciones reales de operación;
- Etapa 3: Conversión de los sobrevoltajes de coordinación a sobrevoltajes requeridos, se obtiene al multiplicar los sobrevoltajes calculados en la etapa 2 por factores de corrección, estos factores dependen del tipo de sobrevoltaje;
- Etapa 4: Conversión de los sobrevoltajes de frente lento a sobrevoltajes a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo, se utiliza la tabla 2 de la norma IEC 60071-2, para escoger valores de aislamiento estándar.

### 3.2.2. COMPARACIÓN DE LOS FACTORES QUE SE EMPLEAN EN LAS NORMAS IEEE STD C.62.82.1 E IEC 60071-2.

Como parte del procedimiento de coordinación de aislamiento es necesario realizar ajustes que unifiquen los cálculos de los sobrevoltajes normalizados calculados a condiciones reales, por los que se debe considerar el tipo de subestación (estructura), diseño de coordinación, seguridad y condiciones ambientales, utilizando los factores que se describen en la tabla 3.6:

**Tabla 3.6.** Factores empleados por las normas IEEE Std C.62.82.1 e IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento.

<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	Factor empleado en la etapa 1, para el cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial, con nomenclatura $k$ cuyo valor depende del neutro del sistema.	Factor empleado en la etapa 1, para el cálculo de sobrevoltajes temporales, con nomenclatura $k$ cuyo valor depende del neutro del sistema.
Factor de espaciamiento	Factor calculado y empleado en la etapa 1 para el cálculo del CFO para determinar los sobrevoltajes por impulso tipo rayo $k_g$ .	No se emplea
Factor de coordinación.	No se emplea.	Factor empleado en la etapa 2, para cálculo de

		sobrevoltajes de tipo temporal soportados de coordinación para ajustar de condiciones normalizadas a reales, $K_c$ .
Factor de coordinación determinista	No se emplea.	Factor empleado en la etapa 2, para cálculo de sobrevoltajes de tipo frente lento soportados de coordinación para ajustar de condiciones normalizadas a reales, $K_{cd}$ .
Factor de Seguridad	Este factor se emplea en la etapa 3, para el cálculo de nivel de aislamiento de impulso tipo rayo (BIL) en donde la norma IEEE Std 1313.2 recomienda que este factor sea de 1.15.	Factor empleado en la etapa 3, para el cálculo de sobrevoltajes soportados especificados de tipo temporal, frente lento, frente rápido, tomando los siguientes valores: $K_s=1.05$ para aislamiento externo $K_s=1.15$ para aislamiento interno.
Corrección atmosférica	Se emplea la corrección atmosférica en la etapa 1 para el cálculo del CFO, dado el caso que no se tenga como dato condiciones ambientales estándar.	En este caso se emplea el factor de corrección atmosférica $K_a$ , el cual se utiliza en la etapa 3, para el cálculo de sobrevoltajes soportados especificados de tipo temporal, frente lento y rápido.

De la tabla 3.6 se puede identificar las similitudes o diferencias en lo que respecta a la utilización de factores de cálculo que aplican las normas IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento, mismos que se detallan a continuación:

- El factor de falla a tierra, el cual es empleado en ambas normas para el cálculo de sobrevoltajes temporales por fallas a frecuencia industrial según se especifica en la norma IEEE Std C62.82.1, y sobrevoltajes temporales por fallas a tierra considerados por la norma IEC 60071-2, para ambas normas el factor depende del tipo de conexión del neutro del sistema.
- Debido a las diferentes estructuras de las subestaciones, distancia de los aisladores y tipo de conexión se debe realizar un ajuste, ya que estos datos influyen en el cálculo de los sobrevoltajes por impulso tipo rayo, por lo tanto, se debe utilizar el factor de espaciamiento empleado por la norma IEEE Std C 62.82.1 para el cálculo del CFO.

- Para el cálculo del valor de soportabilidad, se selecciona un voltaje soportado de coordinación que se obtiene multiplicando el sobrevoltaje representativo por un factor de coordinación  $K_c$ , este factor toma en cuenta los efectos de las incertidumbres en las hipótesis para estos dos valores (el sobrevoltaje soportado prevista y el sobrevoltaje representativo), según la norma IEC 60071-2.
- El método determinista involucra la selección de los voltajes máximos que requieren los equipos de la subestación, por tanto la selección de la rigidez dieléctrica mínima del equipo debe ser considerada con un margen que cubra todas las incertidumbres relevantes para la determinación de estos valores, el voltaje soportado de coordinación se obtiene multiplicando el valor máximo previsto del sobrevoltaje representativo por el factor de coordinación determinista ( $K_{cd}$ ), según la norma IEC 60071-2.
- En una subestación se pueden presentar efectos como las diferencias en el montaje de los materiales, la dispersión de la calidad del producto, calidad de la instalación y envejecimiento del aislamiento durante la vida útil, sin embargo estos efectos no pueden evaluarse individualmente, por lo tanto es necesario emplear el factor de seguridad; existe una diferencia de aplicación de este factor ya que en la norma IEC 60071-2 el factor debe ser aplicado tanto para el aislamiento interno como externo, mientras que la norma IEEE Std C.62.82.1 considera que el factor debe ser igual tanto para el aislamiento interno como externo, para el cálculo del BIL.
- Se debe tomar en cuenta las diferencias entre las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas y aquellas que se esperan en condiciones operativas, por ello en la norma IEC 60071-2 e IEEE Std C.62.82.1 se realiza la corrección atmosférica, dado que, un aspecto común es la evidente afectación que sufren los aislamientos externos por el tema de altitud; en el caso de la norma IEEE Std C62.82.1 se emplea la corrección para el voltaje de flashover, como parte del cálculo de sobrevoltajes por impulso tipo rayo, y en la norma IEC 60071-2 para el cálculo de sobrevoltajes soportados especificados de tipo temporal, frente lento y rápido.

### **3.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS NORMAS IEEE STD C.62.82.1 E IEC 60071-2.**

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de los ejemplos de coordinación de aislamiento para sistemas de 230 kV y 24 kV, mediante la comparación de los valores de aislamiento calculados en las respectivas normas.

En las tablas 3.7 y 3.8 se puede identificar que para los voltajes normalizados obtenidos a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo, la norma IEEE Std C62.82.1 como parte del procedimiento de coordinación de aislamiento, considera que el aislamiento interno debe ser igual al externo, a diferencia de la norma IEC 60071-2 que para el sistema de 230 kV si hay una distinción entre los aislamientos requeridos, lo que puede otorgar mayor seguridad.

### **3.2.3.1 Comparación de los resultados para un sistema de 230 kV**

Se comparan los valores normalizados de los voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo obtenidos como resultados de la coordinación de aislamiento, aplicada en el sistema del ejemplo 1 con la norma IEEE Std C62.82.1 y la norma IEC 60071-2<sup>6</sup>;

*Para voltajes a frecuencia industrial:*

Bajo el procedimiento de la norma IEEE Std C62.82.1, se obtuvo un nivel de aislamiento de 360 kV, mientras que con la norma IEC 60071-2 se obtiene un valor de 395 kV, tanto para aislamiento interno como externo.

Con estos resultados se puede analizar que el valor de aislamiento normalizado obtenido con la norma IEC 60071-2 es mayor que el valor obtenido con la norma IEEE Std C62.82.1, esto se debe al factor de seguridad y factor de coordinación que emplea la norma IEC para la obtención de los voltajes normalizados, a diferencia de la norma IEEE, la cual no aplica estos factores para determinar el voltaje normalizado de corta duración a frecuencia industrial.

*Para voltajes por impulso tipo rayo:*

Con la norma IEEE Std C62.82.1, se obtuvo un nivel de aislamiento de 1050 kV, con la norma IEC 60071-2 se obtiene un valor de aislamiento externo de 1050 kV y 950 kV para el aislamiento interno, tanto la norma IEEE como IEC consideran un factor de seguridad de

---

<sup>6</sup> Los resultados se toman del Producto 2 del Trabajo de Integración Curricular “Comparación de las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1 para la coordinación de aislamiento en Sistemas Tipo I” elaborado por otra estudiante.



15% para determinar el voltaje soportado por impulso tipo rayo para el aislamiento externo, por esta razón los resultados obtenidos en ambas normas son similares.

**Tabla 3.7.** Resultados del aislamiento normalizado según la norma IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 para un sistema de 230 kV.

<b>Voltaje normalizado</b>	<b>Aislamiento externo - Norma IEC 60071-2</b>		<b>Aislamiento interno - Norma IEC 60071-2</b>	<b>Aislamiento interno y externo - Norma IEEE Std C62.82.1</b>
	<b>[kV]</b>		<b>[kV]</b>	<b>[kV]</b>
<b>Máximo Voltaje del sistema</b>	245		245	242
<b>Voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial</b>	395		395	360
<b>Voltaje de soportabilidad por impulso tipo rayo</b>	Fase – Fase 1050	Fase-Tierra 950	950	1050

### 3.2.3.2 Comparación de los resultados para un sistema de 24 kV.

Se comparan los valores normalizados de los voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo obtenidos como resultados de la coordinación de aislamiento, aplicada en el sistema del ejemplo 2 con la norma IEEE Std C62.82.1 y la norma IEC 60071-2<sup>7</sup>;

<sup>7</sup> Los resultados se toman del Producto 2 del Trabajo de Integración Curricular “Comparación de las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1 para la coordinación de aislamiento en Sistemas Tipo I” elaborado por otra estudiante.

*Para voltajes a frecuencia industrial:*

Realizando los cálculos correspondientes se obtuvo un nivel de aislamiento de 50 kV con la norma IEEE Std C62.82.1 igual que con la norma IEC 60071-2, el valor del aislamiento interno es igual que el del externo para ambas normas.

*Para voltajes por impulso tipo rayo:*

Bajo la norma IEEE Std C62.82.1 se obtuvo un nivel de aislamiento de 125 kV, al igual que con la norma IEC 60071-2, el valor del aislamiento interno es igual que el del externo para ambas normas.

**Tabla 3.8** Resultados del aislamiento normalizado según la norma IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 para un sistema de 24 kV.

<b>Voltaje normalizado</b>	<b>Aislamiento externo -Norma IEC 60071-2 [kV]</b>	<b>Aislamiento Interno- Norma IEC 60071-2 [kV]</b>	<b>Aislamiento- Norma IEEE Std C62.82.1 [kV]</b>
<b>Máximo Voltaje del Sistema</b>	24	24	26.2
<b>Voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial</b>	50	50	50
<b>Voltaje de soportabilidad por impulso tipo rayo</b>	125	125	125

A pesar de que los resultados obtenidos son iguales se debe tomar en cuenta que la norma IEEE considera que el aislamiento interno es igual al aislamiento externo, mientras que la norma IEC si establece una diferencia entre aislamiento interno y externo por medio de los factores de seguridad empleados como parte de los cálculos de los voltajes normalizados.

Para el caso de voltajes soportados a frecuencia industrial la diferencia radica en que la norma IEC aplica el factor de seguridad del 5% para aislamiento interno y del 15 % para el aislamiento externo, la norma IEEE no considera este factor como parte del procedimiento, para los voltajes soportados a impulso tipo rayo ambas normas utilizan el factor de seguridad del 15 % con la diferencia que la norma IEEE considera que este factor debe ser

el mismo tanto para el aislamiento externo como para el interno, mientras que la norma IEC aplica un factor de seguridad del 5 % para el aislamiento interno.

### **3.3 CONCLUSIONES**

En base al análisis realizado en este trabajo de Integración Curricular se concluye que para realizar la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I se pueden emplear las normas IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2. Como parte de su estructura, ambas normas abarcan dos partes, la primera parte contiene conceptos básicos y niveles de aislamiento estándar y la segunda parte una guía detallada y ejemplos de aplicación.

De análisis realizado se extrae que por la forma como está estructurada la norma IEEE Std C62.82.1, su aplicación puede ser un poco más compleja que la norma IEC, debido a que en el procedimiento se involucra más de una norma, es decir que deben articular diferentes conceptos que no están unificados en solo documento, lo que puede representar cierta dificultad para el lector, mientras que en la norma IEC 60071-2 se emplea una sola norma, compuesta de dos partes, lo que hace que el proceso sea más ordenado.

Para el procedimiento de coordinación de aislamiento ambas normas utilizan el método determinístico y estadístico y comparten parámetros similares para determinar los voltajes soportados a frecuencia industrial y por impulso tipo rayo; y en ambos casos, a pesar de que son obtenidos de manera diferente y su nomenclatura es diferente, permiten un adecuado ajuste para establecer valores normalizados de voltajes.

La coordinación de aislamiento siguiendo la norma IEEE Std C62.82.1 o la norma IEC 60071-2, permite determinar los valores estándares de aislamiento tanto interno como externo. De forma general la principal diferencia radica en el procedimiento empleado; durante las distintas etapas que conlleva el proceso de coordinación en cada norma, para transformar los voltajes normalizados calculados a condiciones reales operativas del sistema, se van aplicando factores relacionados con la seguridad y condiciones ambientales; la norma IEC 60071-2 emplea más factores por lo que se puede concluir que confiere un mayor grado de seguridad para la selección del aislamiento.

Otra diferencia importante radica en las condiciones para normalizar el voltaje, la norma IEC hace ajustes a través de un factor de seguridad que aumenta el nivel del aislamiento en un 15% para el aislamiento interno y un 5% para el aislamiento externo, mientras que la norma IEEE considera que el aislamiento interno debe ser igual al externo considerando un factor del 15% solo para sobrevoltajes de impulso rayo, siendo por tanto una norma más

conservadora, y recomendable en casos donde las condiciones atmosféricas del sitio de implantación puedan afectar el desempeño del aislamiento.

Bajo estas consideraciones, se recomienda el uso de la norma IEEE Std C62.82.1 para instalaciones con condiciones operativas especiales, en casos donde no hay mucha información requerida para los estudios de coordinación. Asimismo, para sistemas con un voltaje nominal menor a los 15 kV se recomienda utilizar la norma IEC 60071-2 dado que la norma IEEE no cuenta con valores normalizados de voltaje para sistemas con voltajes menores a los 15kV.

Para sistemas tipo I, se recomienda el uso de la norma IEC, debido a que su procedimiento de aplicación es más completo, ya que considera no solo sobrevoltajes de frente lento a los que estos sistemas se encuentran expuestos, sino que además mediante factores de coordinación los normaliza a voltajes de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial que podrían afectar al sistema. La norma IEEE Std C62.82.1 no realiza esta consideración ya que estos sobrevoltajes son normalizados con el cálculo del BSL (nivel básico de aislamiento por impulso maniobra) el cual es calculado únicamente en sistemas tipo II.

### **3.4 RECOMENDACIONES**

Este trabajo de integración curricular podría avanzar hacia la comparación de las normas IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo II (voltajes mayores a 245 kV).

A pesar de que el desarrollo de este Trabajo de Integración Curricular no tiene por objetivo un estudio de coordinación, sino más bien del análisis detallado de un caso de estudio teórico con fines comparativos, para estudios de coordinación de aislamiento se recomienda el uso de simulaciones con modelos reales de sistemas eléctricos para obtener resultados cercanos a la realidad.

Dentro de las etapas del procedimiento para la coordinación de aislamiento utilizando la IEEE Std C62.82.1 no se determina las separaciones mínimas de aire requeridas, por lo tanto se recomienda realizar el análisis de las distancias mínima de separación en el aire entre el conductor-estructura para evitar que se originen descargas entre ellos y complementar el estudio de coordinación.

En general para sistemas de transmisión, se recomienda utilizar la norma IEC 60071-2 por su confiabilidad y orden metodológico para estudios de coordinación, en sistemas nuevos que se vayan a implementar.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std C62.82.1, "IEEE Standard for Insulation Coordination-Definitions, Principles, and Rules," 2016.
- [2] IEC 60071-1:2006," Insulation coordination. Part 1: Definitions, principles, and rules," 2006.
- [3] J. A. Martínez Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, Cataluña: Red Eléctrica de España, 2008.
- [4] P. R. Barrionuevo Guerra, "Ayuda Computacional para la Coordinación de Aislamiento en el diseño de Subestaciones Eléctricas," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [5] J. E. Zambrano Bonilla, "Análisis de la Coordinación de Aislamiento de la línea Quixal Tactic," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2011.
- [6] U.T.N. Facultad Regional Rosario, "Cátedra en Aislación", Bogotá: Repositorio U.T.N,2011, Acceso: nov.18,2021, [En línea]. Available:  
[https://www.froo.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5\\_anio/transmision\\_distribucion\\_energia\\_electrica/files/Aislacion.pdf](https://www.froo.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5_anio/transmision_distribucion_energia_electrica/files/Aislacion.pdf).
- [7] A. R. Hileman, "Specifying the Insulation Strength Insulation Coordination for Power Systems", Carolina del Norte, Taylor & Francis, 2018, pp. 1-25.
- [8] IEEE Std 1313.2, "IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination," 1999.
- [9] J. F. Rios Sigcho, "Coordinación de Aislamiento para la línea a 500 kV, doble circuito, de la interconexión Perú-Ecuador, por sobrevoltajes de maniobra.," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2019.
- [10] IEEE Std C62.22-1991, "Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems," 1991.
- [11] A. Greenwood, "Protection of Systems and Equipment against Transient Overvoltages," Electrical Transients in Power Systems, Canadá, John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 513-550.
- [12] P. S. Cañizares Cárdenas, "Estudio de los sobrevoltajes en redes de distribución.," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2000.

- [13] IEEE Std 1243-1997, "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines," 1997.
- [14] IEC 600071-2:1996, "Insulation co-ordination –Part 2: Application guide," 1996.
- [15] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2127:2013, "Transformadores, Niveles de Aislamiento. Requisitos," 2013.
- [16] D. M. Villalba Noriega, "Comparación entre normas IEEE e IEC sobre Coordinación de Aislamiento( En Sistemas de Distribución hasta 69 kV)," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [17] A. J. Guerrero Gallego, "Mitigación de sobretensiones por maniobras en líneas de transmisión de 500 kV," Universidad de los Andes, Bogotá, 2016.
- [18] A. M. Orquera Ayala, "Análisis de los métodos para la limitación de sobrevoltajes en el anillo de 230 kV del SNT en maniobras de restauración del sistema luego de un colapso," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [19] E. E. Chaj Ramírez, "Análisis de sobrevoltajes debido a transitorios de maniobra en Sistemas Eléctricos de Potencia mayores a 300 kV," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2008.
- [20] E. G. Mora Villagómez y C. E. Muñoz Valencia, "Análisis del sistema de puesta a tierra de la Casa de Cultura Núcleo del Guayas," Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2010.
- [21] C. A. Fonseca Amaya, "Capacitores en media tensión. Aplicación en la subestación Loja.," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2003.

## 5 ANEXOS

### ANEXO I. Tabla de características del pararrayos según la norma IEEE Std C62.22-1991 [10]<sup>8</sup>.

Clase de Subestación			
Funcionamiento en estado Estable			
Voltajes del sistema y valores nominales del pararrayos			
Voltaje Máximo del Sistema Fase-Fase (kV/rms)	Voltaje máximo del sistema Fase- Tierra (kV/rms)	MCOV Mínimo (kV/rms)	Ciclo de trabajo (kV/rms)
26.2	15.12	15.3 <sup>9</sup>	18-27
242	139.72	140	172-240
Clase Intermedia			
4.37-169	2.52-97.67	2.8-98	3-144

<sup>8</sup> La tabla que se presenta esta resumida acorde a los valores que se necesita para los ejemplos de cálculo de coordinación de aislamiento realizados en el capítulo 2 sección 2.1.2 y 2.2.2, se recomienda revisar la referencia [10] tabla 1 en donde se puede visualizar el MCOV para un rango de voltajes desde 4.37 kV hasta 800 kV.

<sup>9</sup> El valor que se subraya en la tabla de color amarillo corresponde al MCOV seleccionado para el ejemplo de coordinación de aislamiento para el sistema de 24 kV, lo subrayado con color turquesa corresponde al MCOV seleccionado para el ejemplo de coordinación de aislamiento para el sistema de 230 kV.



## ANEXO II. Características de MCOV para subestaciones con pararrayos

Se presenta una tabla resumida con los valores que se necesita para los ejemplos de cálculo de coordinación de aislamiento realizados en el capítulo 2 sección 2.1.2 y 2.2.2, se recomienda revisar la referencia [11] tabla 16.4 en donde se puede visualizar el valor de MCOV, para un rango de voltajes desde 2.33 kV hasta 485 kV, si se desea realizar la coordinación de aislamiento para otros niveles de voltaje.

Como los valores que se indican en la tabla son valores máximos, se puede tomar un valor menor o aproximado para los datos que se deben poner en la tabla 1.9 presentada en este trabajo de integración curricular en la sección 1.4.4.

Por otra parte se debe considerar el tipo de pararrayos que se utiliza para un MCOV de 22 kV, se utiliza el pararrayos tipo VL 216022, y para un MCOV de 140 kV el pararrayos tipo VN 217740, como lo recomienda la referencia [11].

Tabla de las características de MCOV para subestaciones con pararrayos [11]

Pararrayos MCOV kV,rms	Máximo voltaje de descarga a $0.5\mu s$	Máximo Voltaje de descarga a $8/20\mu s$	
		5 kA	10 kA
15.3	53.3	44.1	50.1
140	464	404	423