

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 IEC 60071-2
CON APLICACIÓN A DOS MODELOS TEÓRICOS**

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

DAYANA MISHHELL MANOSALVAS COPPIANO

dayanamanosalvas@hotmail.com

DIRECTOR: Dra. XIMENA PATRICIA GAVELA GUAMÁN

Ximena.gavela@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Dayana Mishell Manosalvas Coppiano 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.

DAYANA MANOSALVAS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Dayana Mishell Manosalvas Coppiano, bajo mi supervisión.

XIMENA PATRICIA GAVELA GUAMÁN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) 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.

DAYANA MISHHELL MANOSALVAS COPPIANO

XIMENA PATRICIA GAVELA GUAMÁN

DEDICATORIA

A mis abuelitos

Lilia y Vicente

Con mucho cariño, los amo.

AGRADECIMIENTO

A mis abuelitos, Lilia y Vicente quienes me han dado su amor y apoyo incondicional para poder ser una persona de bien y cumplir siempre mis metas.

A mis padres, Patricia y Rodrigo quienes siempre han estado pendientes de que no me falte nada y pueda seguir cumpliendo mis objetivos.

A mis tíos, Mercedes, Lennis y Henry quienes a lo largo de mi vida me han apoyado y me han dado fuerzas para que nunca me rinda y siempre logre cumplir mis sueños.

A mis amigos, Bryan, Xavier y Evelyn quienes han compartido conmigo los buenos y malos momentos a lo largo de este camino.

A la Dra. Ximena Gavela, quien con su dirección, conocimiento, paciencia y apoyo se logró elaborar el presente proyecto.

RESUMEN

El estudio de coordinación de aislamiento es fundamental en la etapa de análisis y diseño de los sistemas de potencia, ya que mediante este se asegura que los niveles de aislamiento sean adecuados, garantizando así que los equipos puedan soportar los sobrevoltajes que se puedan originar.

Existen dos normas internacionales para la coordinación de aislamiento, la IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2, ambas normas cumplen con el objetivo de establecer o encontrar un nivel de aislamiento adecuado, bajo procedimientos o metodologías distintas.

Dentro de este contexto, se desarrolla el presente trabajo de integración curricular que tiene como fin detallar en un ejemplo teórico, el procedimiento establecido en la norma IEC 60071-2 para la coordinación del aislamiento en sistemas tipo I con el fin de realizar un análisis comparativo de resultados respecto de la norma IEEE Std C62.82.1

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

ABSTRACT

The insulation coordination study is fundamental in the analysis and design stage of power systems, since it ensures that the insulation levels are adequate, thus guaranteeing that the equipment can withstand the surges that may arise.

There are two international standards for insulation coordination, the IEEE Std C62.82.1 and IEC 60071-2, both standards comply with the objective of establishing or finding an adequate insulation level, under different procedures or methodologies.

Within this context, the present work of curricular integration is developed with the purpose of detailing in a theoretical example, the procedure established in the IEC 60071-2 standard for the coordination of isolation in type I systems in order to perform a comparative analysis of results with respect to the IEEE Std C62.82.1 standard.

KEYWORDS: Insulation, insulation coordination, IEC 60071-2 standard, IEEE Std C62.82.1 standard, type I systems, overvoltages.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
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
1.4.1.1 Sobrevoltajes temporales	4
1.4.1.2 Sobrevoltajes de frente lento	5
1.4.1.3 Sobrevoltajes de frente rápido	6
1.4.2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO	6
1.4.2.1 Características del aislamiento eléctrico	6
1.4.3 CRITERIOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO	8
1.4.3.1 Formas de onda normalizada	8
1.4.4 PROCEDIMIENTO PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO SEGÚN LA NORMA IEC 60071-2	9
1.4.4.1 Etapa 1: Cálculo de sobrevoltajes representativos (U _{rp})	11
1.4.4.2 Etapa 2: Cálculo de los voltajes soportados de coordinacion (U _{cw})	19
1.4.4.3 Etapa 3: Cálculo de los voltajes soportados requeridos (U _{rw})	22
1.4.4.4 Etapa 4: Selección del voltaje tolerable normalizado	24
2 METODOLOGÍA	27
2.1 EJEMPLO 1: SISTEMA CON VOLTAJE NOMINAL DE 230 KV	27
2.1.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES A FRECUENCIA INDUSTRIAL Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS (URP)	28
2.1.1.1 Sobrevoltajes a frecuencia industrial	28
2.1.1.2 Sobrevoltajes temporales	28
2.1.1.3 Sobrevoltajes de frente lento	29
2.1.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN (UCW) ...	34

2.1.2.1 Sobrevoltajes temporales.....	34
2.1.2.2 Sobrevoltajes de frente lento	35
2.1.2.3 Sobrevoltajes de frente rápido	36
2.1.3 ETAPA 3: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS	37
2.1.3.1 Sobrevoltajes temporales.....	37
2.1.3.2 Sobrevoltajes de frente lento	38
2.1.3.3 Sobrevoltajes de frente rápido	39
2.1.4 ETAPA 4: SELECCIÓN DEL VOLTAJE SOPORTADO NORMALIZADO	40
2.1.4.1 Corrección del voltaje soportado de corta duración al voltaje a frecuencia industrial (SDW).	40
2.1.4.2 Corrección al voltaje soportado a impulso tipo rayo (LIW).....	40
2.2 EJEMPLO 2: SISTEMA CON VOLTAJE NOMINAL DE 24 KV	42
2.2.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS (URP)	43
2.2.1.1 Sobrevoltajes a frecuencia industrial	43
2.2.1.2 Sobrevoltajes temporales.....	43
2.2.1.3 Sobrevoltajes de frente lento	44
2.2.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN (UCW) ..	46
2.2.2.1 Sobrevoltaje temporales	47
2.2.2.2 Sobrevoltajes de frente lento	47
2.2.2.3 Sobrevoltaje de frente rápido	47
2.2.3 ETAPA 3: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS (URW).....	48
2.2.3.1 Para los sobrevoltajes temporales.....	48
2.2.3.2 Sobrevoltajes de frente lento	49
2.2.3.3 Sobrevoltajes de frente rápido	49
2.2.4 ETAPA 4: SELECCIÓN DEL VOLTAJE SOPORTADO NORMALIZADO	50
2.2.4.1 Corrección al voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial (SDW).	50
2.2.4.2 Corrección al voltaje soportado a impulso tipo rayo (LIW).....	50
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
3.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS EJEMPLOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO.....	52
3.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS DEL EJEMPLO 1 PARA UN SISTEMA DE 230 KV	52
3.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL EJEMPLO 2 PARA UN SISTEMA DE 24 KV	53
3.2 ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN ENTRE LAS NORMAS LA NORMA IEC 60071-2 E IEEE STD. C62.82.1.....	53
3.2.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DE LA NORMA IEC 60071-2 E IEEE STD C.62.82.1.....	58
3.2.1.1 Análisis comparativo de los resultados para un sistema de 230 kV	59

3.2.1.2 Análisis comparativo de los resultados para un sistema de 24 kV	60
3.3 CONCLUSIONES	61
3.4 RECOMENDACIONES	63
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
5 ANEXOS	65

1 INTRODUCCIÓN

La coordinación de aislamiento puede entenderse como la selección de la rigidez dieléctrica del material de los equipos presentes en el SEP en función del voltaje que se puede presentar, considerando las características de los dispositivos de protección y condiciones ambientales a las que el sistema se encuentra expuesto [3].

La norma IEC 60071-2 clasifica a los voltajes normalizados más elevados del material en sistemas tipo I y II. Los sistemas tipo I abarcan sistemas de distribución y subtransmisión que generalmente son diseñados y operados a niveles menores que 245 kV. Dichos sistemas se encuentran expuestos permanentemente a fallas de tipo temporal o situaciones externas tales como caídas o contacto de objetos sobre las líneas y/o descargas atmosféricas, siendo estas las principales fuentes de sobrevoltajes para estos sistemas [1].

Las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1 establecen procedimientos propios para la coordinación de aislamiento, y dentro de la literatura científica no se ha encontrado un análisis sobre la conveniencia de aplicar una u otra norma.

Dentro de este contexto, dada la necesidad de estudiantes, docentes y profesionales de contar con una guía de aplicación detallada para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I, con base al análisis de las normas vigentes para coordinación de aislamiento, en el presente trabajo de integración curricular se realiza un análisis comparativo de las dos normas.

Para el efecto, se aplica la norma IEC a través de los estándares IEC 60071-1 e IEC 60071-2 a un modelo teórico propuesto en la misma norma, con el fin de detallar los cálculos que deben realizarse para la selección de parámetros y orientar así de mejor manera el análisis comparativo en base a resultados obtenidos en el producto 2 del proyecto de integración curricular Comparación de las normas IEC 60071-2 e IEEE std c62.82. para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I desarrollado por otra estudiante.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo entre las normas IEC 60071-2 e IEEE STD C62.82.1 en base al procedimiento y resultados obtenidos de la aplicación a dos modelos teóricos en sistemas tipo I.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar y describir los sobrevoltajes más representativos en sistemas tipo I.
2. Analizar y describir la metodología aplicada para el proceso de coordinación de aislamiento en sistemas tipo I, establecido en la norma IEC 60071-2.
3. Aplicar la metodología establecida para coordinación de aislamiento según la norma IEC 60071-2 a dos modelos teóricos con la finalidad de comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación de la norma IEEE STD C62.82.2 para sistemas tipo I.
4. Realizar recomendaciones en base a los resultados obtenidos del análisis comparativo entre las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.2 para sistemas tipo I.

1.3 ALCANCE

En el presente trabajo de integración curricular se analizará los puntos más importantes para la coordinación de aislamiento en sistemas tipo I según lo establece la norma IEC 60071-2. Para el efecto, mediante la aplicación del procedimiento para coordinación de aislamiento a dos sistemas teóricos se analizará y comparará los resultados obtenidos mediante la metodología de la norma IEC, frente a los resultados presentados bajo la metodología de la norma IEEE.

A partir de los resultados obtenidos de las dos normas se realizará un análisis comparativo, además de describirá recomendaciones para la selección y/o cálculo de los parámetros para coordinación de aislamiento en sistemas tipo I, así como la conveniencia y selección de una u otra norma.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 SOBREVOLTAJES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Un sobrevoltaje puede definirse como el aumento de la amplitud de voltaje respecto a su voltaje nominal. Los sistemas eléctricos están permanentemente expuestos a sobrevoltajes o perturbaciones que pueden dañar el aislamiento de los componentes y equipos del sistema eléctrico de potencia. En el caso de sistemas tipo I, estos están sometidos permanentemente a sobrevoltajes que generalmente son de origen interno, del tipo temporal, los cuales son provocados generalmente por fallas o rechazo de carga, o por sobrevoltajes de origen externo, por causa de descargas tipo rayo.

Dentro de este contexto, 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, y tomando en cuenta que la característica fundamental de los equipos eléctricos está determinada por el nivel de aislamiento que pueden soportar, una adecuada coordinación de aislamiento es fundamental para asegurar que los equipos se encuentren protegidos y que el servicio de energía eléctrica permanezca continuo ante las fallas que pueden aparecer debido a dichos sobrevoltajes.

De manera que, la norma IEC ha desarrollado una estandarización de los niveles de aislamiento, así como un procedimiento para su coordinación. La norma IEC 60071-1, clasifica a los sistemas de potencia en [1]:

Sistemas tipo I: Voltaje eficaz de 1 kV a 245 kV.

Sistemas tipo II: Voltaje eficaz mayor a los 245 kV.

Como se mencionó, los sistemas tipo I se ven afectados principalmente por sobrevoltajes de tipo temporal y frente rápido, mientras que los sistemas tipo II por sobrevoltajes de tipo maniobra y frente rápido, por lo que el procedimiento de coordinación básicamente toma en cuenta este tipo de sobrevoltajes para el efecto.

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



Figura 1.1. Clasificación de los sobrevoltajes según la norma IEC 60071-2. Elaboración propia en base a [1].

La Figura 1.1 muestra la clasificación de los tipos de sobrevoltajes. A continuación, se describen los distintos tipos de sobrevoltajes.

1.4.1.1 Sobrevoltajes temporales

Son sobrevoltajes temporales a frecuencia industrial y de larga duración, este tipo de sobrevoltajes pueden ser amortiguados o levemente amortiguados. Dependiendo su origen, la frecuencia será menor, igual o mayor a la frecuencia de la red y con un tiempo de duración mayor a la decena de milisegundos. También se lo conoce como sobrevoltaje sostenido, y perduran en el sistema hasta que se elimine la causa o se modifique el origen del sobrevoltaje [5].

Entre los principales factores que originan los sobrevoltajes temporales se tiene:

Fallas de fase a tierra

Una de las causas más usuales de sobrevoltajes temporales son las fallas a tierra. Inicialmente, al producirse una falla con contacto entre una o dos de las fases, se genera un transitorio, lo cual produce un sobrevoltaje a una frecuencia diferente a la frecuencia de la red. Al eliminarse el transitorio inicial queda una elevación de voltaje entre la fase o fases no falladas [6].

Al estudiar los sobrevoltajes temporales originados por fallas a tierra, generalmente es adecuado solo tratar fallas monofásicas, debido a que normalmente produce mayores

sobrevoltajes. Las fallas monofásicas a tierra, en las fases no falladas, originan sobrevoltajes fase-tierra; mas no generan sobrevoltajes temporales a través del aislamiento longitudinal o entre fases [3].

Lo que determina las amplitudes del sobrevoltaje son: la puesta a tierra del neutro y la localización de la falla. En la norma IEC 60071-2, en el Anexo B, se encuentra una guía para determinar las amplitudes del sobrevoltaje.

Los sistemas con configuración normal suponen que la amplitud del sobrevoltaje representativo es igual a su valor máximo. En cuanto a los sistemas con configuración anormal se analizan aparte, por ejemplo, en las partes del sistema con neutros aislados en un sistema con neutro generalmente puesto a tierra; considerando la probabilidad de que sucedan fallas a tierra simultáneamente [2].

La duración del sobrevoltaje concuerda con la de la falla, hasta su eliminación. La duración generalmente es menor a 1 s en sistemas con el neutro puesto a tierra.

El despeje de la falla es normalmente menor a 10 s en sistemas con neutro puesto a tierra mediante de bobinas de compensación. Mientras que, en sistemas sin eliminación de fallas, el sobrevoltaje puede presentarse por numerosas horas. En esas situaciones, si es forzoso, se puede definir el voltaje permanente a frecuencia industrial como el valor del sobrevoltaje temporal durante la falla a tierra [2].

Pérdida o rechazo de carga:

Una operación de disparo de los interruptores, errores humanos, o condiciones de sobrecarga pueden generar la desconexión brusca de cargas importantes. La pérdida de carga aumenta los voltajes de la red porque se reduce la caída de voltaje en las impedancias de los equipos incluidos, especialmente, inmediatamente después de la desconexión, en los instantes en los que todavía los reguladores de voltaje no han surtido efecto [3].

Además, es posible que la pérdida de carga dé lugar a sobrevoltajes entre fases y tierra en tanto que longitudinales. El aumento de voltaje fase-tierra de las tres fases es idéntico, por lo cual los mismos sobrevoltajes relativos ocurren entre fase-tierra y fase-fase [3].

1.4.1.2 Sobrevoltajes de frente lento

Los sobrevoltajes de frente lento se generan eminentemente por la maniobra de equipos en las subestaciones como la energización y desenergización de líneas. Estos

sobrevoltajes alcanzan frecuencias de entre los 2 y 20 kHz, y su tiempo de cola varía entre varios cientos de microsegundos a varios milisegundos [3].

1.4.1.3 Sobrevoltajes de frente rápido

La duración de estos sobrevoltajes es corta. Se originan por la caída de rayos cercanos a las fases del conductor. También se pueden generar debido a cortocircuitos y maniobras. Este tipo de sobrevoltaje es unidireccional, su tiempo de cola es menor a 300 μ s, y el valor de cresta de su tiempo de subida va de 0.1 a 20 μ s. El impacto directo de rayos en líneas y subestaciones eléctricas pueden generar sobrevoltajes de origen atmosférico, así como pueden ser inducidos por rayos que impactan cerca de las líneas o subestaciones [3].

1.4.2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

1.4.2.1 Características del aislamiento eléctrico

El aislamiento de un equipo eléctrico se define como la capacidad de soportar la aplicación de un determinado voltaje. Este se clasifica en [3], [8]:

Aislamiento autorregenerable: Es aquel que recobra sus propiedades cuando desaparecen el contorneo y aquello que lo causó [3].

Aislamiento no autorregenerable: Puede averiarse parcial o totalmente a partir de una descarga disruptiva, es decir, no recupera sus propiedades después de la descarga [3].

Dentro de esta clasificación, se tiene que los aislamientos autoregenerables son los que son líquidos y gaseosos, mientras que los sólidos son no autorregenerables.

Otra forma de clasificar el aislamiento eléctrico es la siguiente:

Aislamiento externo: Consiste en la distancia por medio del aire o de una superficie exterior expuesta al aire. Se encuentra propenso a solicitaciones dieléctricas y ambientales, tales como la contaminación y la humedad [3].

Aislamiento interno: Consiste en el interior del aislamiento de un equipo eléctrico que se encuentra aislado contra las condiciones ambientales, a través de una o más envolventes [3].

Mientras que el aislamiento interno es autorregenerable, el externo es autorregenerable.

Por otro lado, la configuración del aislamiento describe la geometría en servicio, la cual consiste en el aislamiento y todos los bornes; incluyendo los componentes aislantes y conductores que afectan en el comportamiento dieléctrico [1].

Las configuraciones de aislamiento se clasifican en:

Trifásica

Esta configuración consta de tres terminales de fase, uno de neutro y uno de tierra, tal como observa la Figura 1.2 [1]:

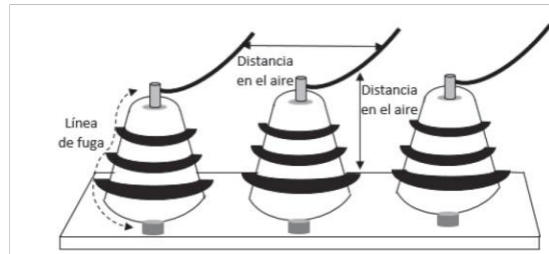


Figura 1.2. Configuración de aislamiento trifásica [8].

La configuración de aislamiento trifásica se divide en:

Fase-tierra (f-t):

Es una configuración en la cual no se consideran los dos terminales de fase, a excepción de casos particulares, el terminal de neutro se encuentra puesto a tierra, tal como se observa la Figura 1.3 [1].

Fase-fase (f-f):

Es una configuración en la que no se toma en cuenta el terminal de fase. En algunos casos específicos, tampoco se consideran los terminales de neutro y de tierra, tal como se observa la Figura 1.3 [1].

Longitudinal (t-t):

Esta configuración de aislamiento toma en cuenta dos terminales de fase y uno de tierra. Estos primeros corresponden a la misma fase de la red trifásica; y generalmente se encuentran separados temporalmente en dos partes energizadas independientemente, tal como se observa la Figura 1.3 [1]:

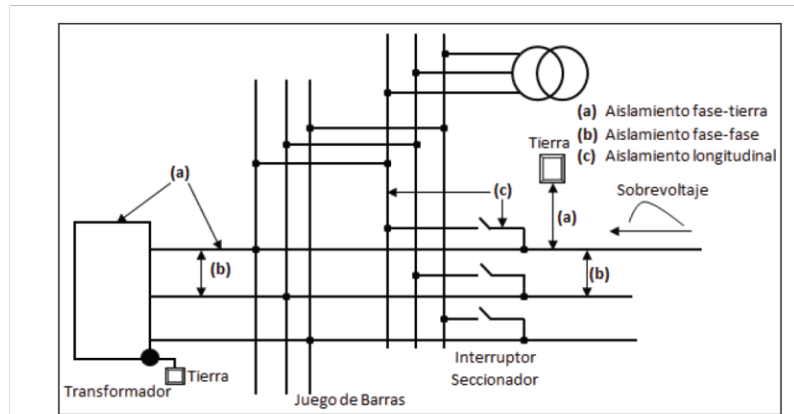


Figura 1.3. Configuración para los aislamientos fase-tierra, fase-fase y longitudinal [8].

1.4.3 CRITERIOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

La finalidad de la coordinación de aislamiento es el estudio de los sobrevoltajes, selección de aislamientos y dispositivos de protección [3].

El objetivo de seleccionar un conjunto de voltajes idóneos soportados normalizados e implantar distancias mínimas en el aire es permitir que el aislamiento de los equipos pueda resistir los sobrevoltajes a los que se encuentren expuestos.

En la Figura 1.4 se muestra la coordinación de aislamiento aplicada de manera individual a uno de los equipos. Arriba, se encuentran los voltajes soportados a impulsos atmosféricos; y abajo, los voltajes soportados a frecuencia industrial [4].

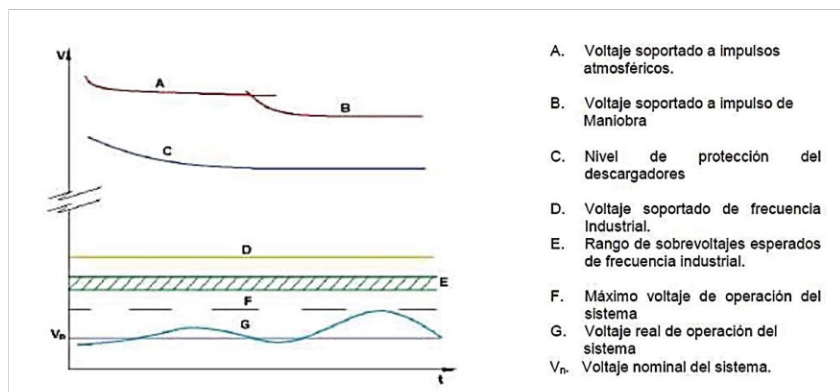


Figura 1.4. Diagrama general de coordinación de aislamiento individual [4].

1.4.3.1 Formas de onda normalizada

Con la finalidad de comprobar el comportamiento del aislamiento en relación a los diferentes tipos de sobrevoltajes, la norma IEC 60071-1 ha instituido formas de ondas normalizadas, de tal modo que en el anexo IV se puede observar a detalle los tipos y formas

de sobrevoltajes, formas de voltaje normalizadas y ensayos de voltaje soportado normalizado [3].

1.4.4 PROCEDIMIENTO PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO SEGÚN LA NORMA IEC 60071-2

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

La norma IEC 60071-1, que cuenta con definiciones, principios y pautas para la coordinación de aislamiento.

La norma IEC 60071-2, que presenta una guía de aplicación para la coordinación de aislamiento.

Los equipos e instalaciones eléctricas se encuentran expuestos permanentemente a sobrevoltajes que pueden afectar el aislamiento provocando un fallo, daño parcial o daño permanente. Por lo tanto, los estudios de coordinación de aislamiento son muy importantes para determinar el nivel de aislamiento para cada sistema. La norma IEC 60071-1 establece una metodología para la coordinación de aislamiento que consiste determinar ciertos valores de voltaje para posteriormente encontrar el voltaje soportado normalizado para sistemas tipo I o II [1].

La metodología utilizada para la coordinación de aislamiento establecida en la norma IEC 60071-1, se basa en un proceso que involucra 4 etapas principales, tal como se observa la Figura 1.5.

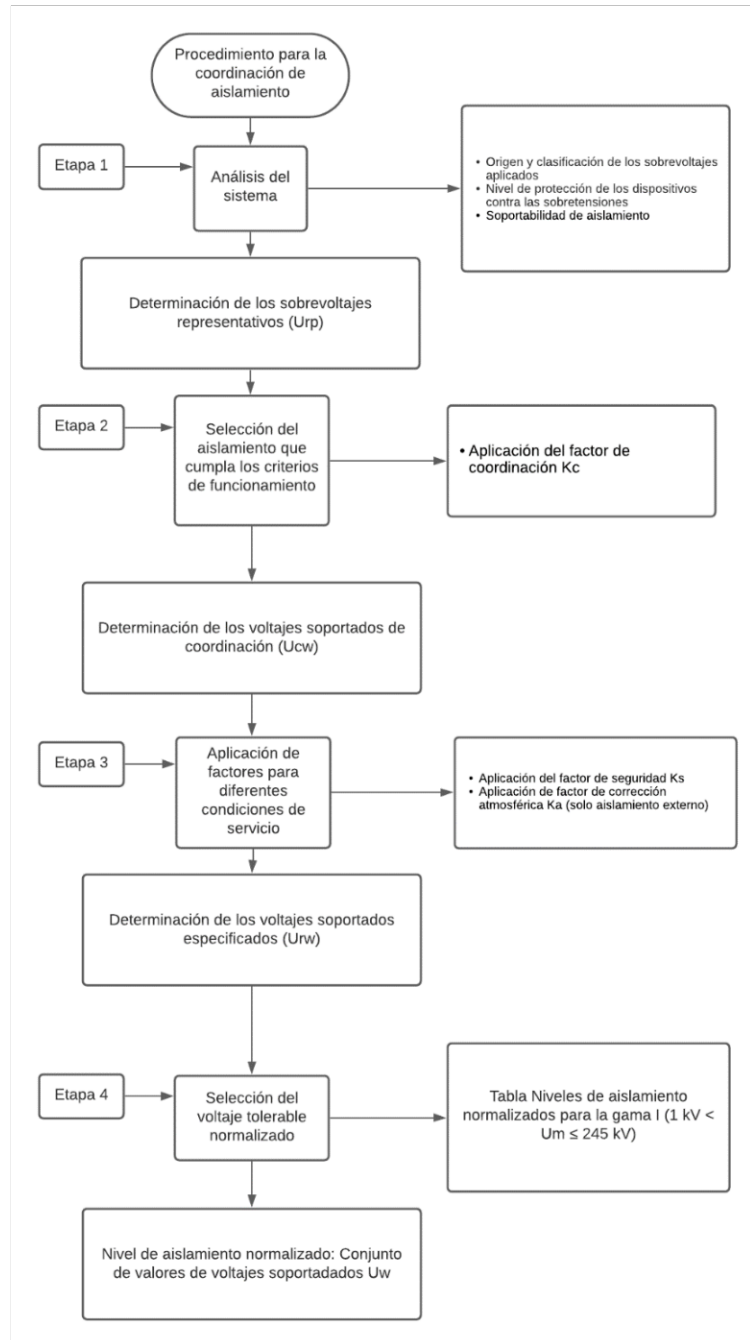


Figura 1.5. Diagrama de flujo para la determinación del nivel de aislamiento normalizado. Elaboración propia con base a [1].

Tal como se observa, la norma involucra en cada etapa una serie de términos asociados con los niveles o tipos de voltaje que se obtienen en cada etapa y se describen detalladamente a continuación:

Sobrevoltajes representativos (Urp): Se trata de sobrevoltajes que producen los mismos efectos dieléctricos en el aislamiento que los sobrevoltajes de algún tipo dado que ocurren debido a diversos orígenes estando en servicio. Se encuentran

constituidos por formas de onda de voltaje normalizadas de una clase y se pueden definir por un valor, un conjunto de valores o una distribución estadística en frecuencia de los valores que simulen condiciones de servicio [1].

Voltaje soportado de coordinación (U_{cw}): Es el valor del voltaje soportado de la configuración de aislamiento a las condiciones reales de servicio, por lo que cumple con el criterio de funcionamiento [1].

Voltaje soportado requerido (U_{rw}): Es el voltaje de ensayo que el aislamiento tiene que soportar durante un ensayo de voltaje soportado normalizado para garantizar que el aislamiento cumple con los criterios de funcionamiento al ser sometido a los sobrevoltajes de una clase dada en condiciones reales y durante su vida útil [1].

Factor de coordinación (K_c): Factor por el que se debe multiplicar el valor de los sobrevoltajes representativos para obtener el voltaje soportado de coordinación [1].

Factor de corrección atmosférica (K_a): Factor por el que se debe multiplicar al voltaje soportado de coordinación con el fin de considerar la diferencia de rigidez dieléctrica entre las condiciones atmosféricas en servicio y las atmosféricas normalizadas [1].

Factor de seguridad (K_s): Factor que se aplica al voltaje soportado de coordinación posterior a la aplicación del factor de corrección atmosférica para obtener el voltaje soportado requerido, para considerar las diferencias de rigidez dieléctrica entre las condiciones de servicio durante la vida útil y aquéllas del ensayo de voltaje soportado normalizado [1].

Voltaje soportado asignado: Es el valor de voltaje aplicado en el ensayo de voltaje soportado normalizado que verifica que el aislamiento cumpla con una o más de los voltajes soportados requeridos. Es un valor asignado para el aislamiento del material [1].

A continuación, se describe de cada una de las etapas involucradas, según la norma IEC 60071-2, en la coordinación de aislamiento:

1.4.4.1 Etapa 1: Cálculo de sobrevoltajes representativos (U_{rp})

En esta etapa se determinan los voltajes representativos, los cuales son todos los sobrevoltajes que pueden aparecer en el sistema. Esta etapa es fundamental porque la coordinación de aislamiento se realiza en base a estos voltajes, de manera que el sistema estará protegido contra todos los sobrevoltajes esperados [2].

La determinación de los voltajes representativos (U_{rp}) consiste en analizar los voltajes y sobrevoltajes del sistema, en base a amplitud, duración y forma. Dentro de cada categoría de sobrevoltajes se puede determinar los voltajes representativos mediante este estudio de voltajes a frecuencia industrial, sobrevoltajes temporales, sobrevoltajes de frente lento y sobrevoltajes de frente rápido [2].

Para los sistemas tipo I, generalmente, los sobrevoltajes representativos son los de tipo temporal y de origen atmosférico. Los casos de mayor estudio son las fallas monofásicas a tierra que representan en 90% de las fallas en estos sistemas y las descargas atmosféricas.

El cálculo de los voltajes representativos se lo realiza en base a los sobrevoltajes que aparecen en el sistema siendo las siguientes:

Sobrevoltajes a frecuencia industrial

En la práctica, entre el voltaje más elevado para el material U_m y el voltaje más alto del sistema U_s , este último debe ser mucho menor. Sin embargo, a medida que el voltaje aumenta, tienden a ser iguales, de tal manera que el valor de U_m debe ser normalizado en base al anexo I, por lo tanto, con propósito de diseño y coordinación de aislamiento se tiene que:

$$U_s \geq U_m \quad (1.1)$$

En la ecuación 1.1

U_s : Valor eficaz (voltaje aplicado a equipos)

U_m : Voltaje más elevado para el material

Sobrevoltajes temporales

La norma IEC 60071-2 establece estos sobrevoltajes por su amplitud, forma de onda y su duración, considerando la procedencia de los sobrevoltajes para sistemas tipo I se tiene:

Sobrevoltajes por falla a tierra

La causa más común de estos sobrevoltajes son las fallas a tierra, generando sobrevoltajes de fase a tierra, el cálculo del sobrevoltaje representativo fase-tierra se lo hace mediante simulaciones o con las siguientes ecuaciones:

$$U_{rp(f-t)} = K \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (1.2)$$

En la ecuación 1.2 :

U_s : Valor eficaz (voltaje aplicado a equipos)

k: Factor de falla a tierra

Para calcular la magnitud de los sobrevoltajes, es preciso obtener el factor de falla a tierra el cual, asimismo, se obtiene utilizando las impedancias complejas Z_1 y Z_0 de los sistemas de secuencia directa y cero, considerando la resistencia de defecto R , por lo que se tiene las siguientes ecuaciones [2]:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (1.3)$$

En la ecuación 1.3:

R_1 : Resistencia del sistema directo e inverso.

X_1 : Reactancia del sistema directo e inverso.

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (1.4)$$

En la ecuación 1.4:

R_0 : Resistencia del sistema de secuencia cero.

X_0 : Reactancia del sistema de secuencia cero.

El análisis de la Figura 1.6 se lo hace en base a las relaciones establecidas en la misma, en el eje horizontal se tiene la relación de X_0/X_1 y en el eje vertical se tiene k, una vez establecido el valor de del eje horizontal, se debe realizar la relación de R_0/X_1 para poder determinar la curva con la que posteriormente se obtendrá el valor para el factor de falla a tierra, cabe mencionar que los valores que se encuentran en el rango sombreado no son aplicables. Por lo general, los valores varían del rango [0;2] [2].

El rango de valores altos de X_0/X_1 está en aquellos sistemas con neutro puesto a tierra por bobina de compensación o en redes con neutro aislado, ya sea en positivo y/o negativo [2].

El rango de valores positivos bajos de X_0/X_1 es válido para las redes neutras conectadas a tierra.

El rango de valores negativos bajos de X_0/X_1 indicado en el sombreado no es adecuado para el uso práctico debido a la existencia de resonancias.

Para las redes con neutro puesto a tierra ver Anexo B de la norma IEC 60071-2.

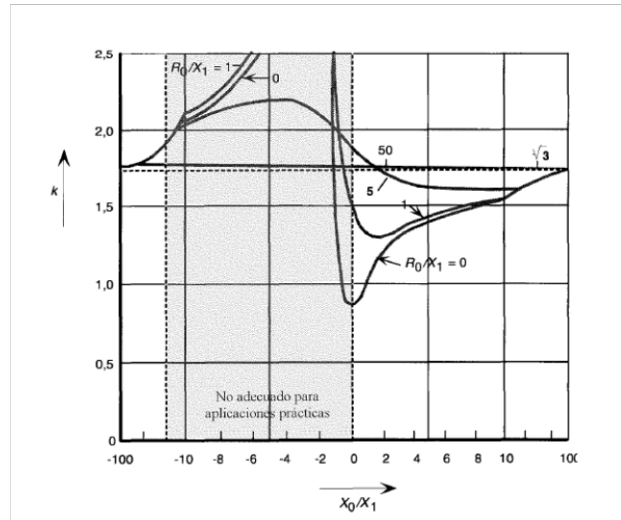


Figura 1.6. Factor de falla a tierra en función de X_0/X_1 cuando $R_1/X_1 = R = 0$ [2].

Otra forma de obtener el valor del factor de falla a tierra es en función de la conexión del neutro, tal como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Valores representativos del factor de falla a tierra. Elaboración propia en base a [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	1.0

Sobrevoltajes por pérdida de carga

Los sobrevoltajes temporales causados por la pérdida de carga generan sobrevoltajes que afectan al aislamiento entre fases y fase-tierra.

El factor de deslastre (K_d) es utilizado en varios documentos para cuantificar la amplitud del sobrevoltaje que puede llegar a tener por pérdida de carga, dicho factor se puede obtener a través de simulaciones del sistema en un software de transitorios electromagnéticos, sin embargo, para sistemas tipo I la norma IEC 60071-2 establece los siguientes valores determinísticos [2]:

En sistemas de tamaño moderado, la pérdida total de carga puede dar lugar a sobrevoltajes de fase a tierra con amplitudes generalmente menores a 1.2 p.u.

En grandes sistemas, los sobrevoltajes fase-tierra que pueden alcanzar 1.5 p.u. o incluso pueden ser mayores cuando ocurren los efectos Ferranti o de resonancia, pueden ser generados por una pérdida total de carga.

Al tener solamente cargas estáticas en la parte desconectada, el sobrevoltaje temporal longitudinal es, en principio, igual al sobrevoltaje fase-tierra en oposición de fase, cuya amplitud máxima es normalmente menor a 2.5 p.u.

El cálculo del voltaje representativo fase-tierra, se lo hace mediante la siguiente ecuación:

$$U_{rp(f-t)} = Kd \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (1.5)$$

De la ecuación 1.5:

U_s : Voltaje eficaz (voltaje aplicado a equipos).

Kd: Factor de deslastre (Nomenclatura unificada de varias referencias utilizadas para la coordinación de aislamiento en base a la norma IEC)

El cálculo del voltaje representativo fase-fase, se lo hace mediante la siguiente ecuación:

$$U_{rp(f-f)} = Kd \cdot U_s \quad (1.6)$$

De la ecuación 1.6:

U_s : Voltaje eficaz fase-fase (voltaje aplicado a equipos).

Kd: Factor de deslastre (Nomenclatura unificada de varias referencias utilizadas para la coordinación de aislamiento en base a la norma IEC).

Para obtener el valor representativo de los eventos presentados se debe escoger el valor máximo obtenido para fase-fase y fase-tierra, para cada caso de sobrevoltajes analizados como se puede observar en la Figura 1.7.

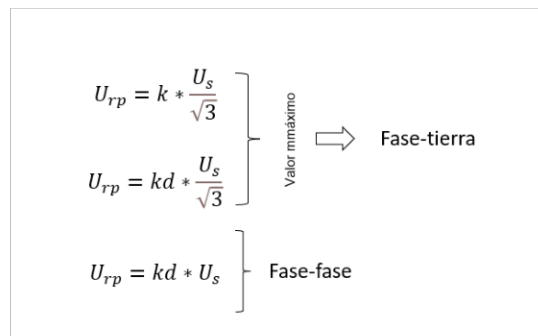


Figura 1.7. Resumen de fórmulas para obtener los sobrevoltajes representativos.

Sobrevoltajes de frente lento

Este tipo de sobrevoltajes generalmente se originan por conexión y reenganche de líneas, pérdida de carga, fallas y su eliminación; especialmente por las descargas atmosféricas lejanas a los conductores de líneas y por la maniobra de los interruptores [2]. Sin embargo, los sobrevoltajes de frente lento por pérdida de carga deben considerarse únicamente cuando superan el valor de 2 p.u ya que normalmente los sobrevoltajes son menores que los provocados por energización y reenganche de líneas.

Sobrevoltajes por conexión y reenganche de líneas

Las conexión o reconexión de una línea trifásica genera sobrevoltajes de maniobra sobre las tres fases de la línea. De tal manera que para cada una de las maniobras se tiene tres sobrevoltajes de fase-tierra y tres fase-fase [2].

Para las aplicaciones prácticas, se han implantado varias simplificaciones en la evaluación de los sobrevoltajes. En cuanto al número de sobrevoltajes de maniobra, existen dos métodos [2]:

Método del valor cresta por fase: Para cada una de las maniobras, el valor de cresta más elevado de los sobrevoltajes entre fases o fase-tierra, son incluidas en la distribución de probabilidad del sobrevoltaje, es decir, cada una de las maniobras contribuyen con tres valores de cresta a la distribución de probabilidad de los sobrevoltajes representativos [2].

De tal manera que, se supondrá que esta distribución es idéntica para los tres aislamientos implicados en cada parte del aislamiento, fase-tierra, fase-fase o longitudinal.

Método del valor cresta por caso: Para cada una de las maniobras, el valor más alto de cresta de los sobrevoltajes entre fase-tierra o fase-fase, son incluidas en la distribución de probabilidad del sobrevoltaje, es decir, cada una de las maniobras contribuyen con un valor en la distribución de probabilidad del sobrevoltaje representativo. Este se aplica a un aislamiento para cada categoría [2].

La distribución de sobrevoltajes de frente lento para fase-tierra se genera de U_{e2} como se observa en la Figura 1.8, la cual es útil como indicación en vistas de determinar el tipo de configuración, ya que si los sobrevoltajes son suficientemente elevados pueden causar inconvenientes. En esta situación, el rango de valores indica hasta qué punto los sobrevoltajes pueden ser limitados. Para alcanzar este objetivo, es imprescindible realizar estudios detallados.

Además, la Figura 1.8 se basa en determinar a qué configuración pertenece el caso de estudio, se empieza analizando si se trata de una conexión o reenganche al tener definido este paso se procede al siguiente paso donde se determina si cuenta con resistencias de preinserción, luego, si la red de alimentación es compleja o inductiva y finalmente se analiza la compensación en paralelo, dando como resultado una columna en la que traza líneas horizontales obteniendo el valor máximo y mínimo para proceder a realizar un promedio y obtener el valor correspondiente de U_{e2} .

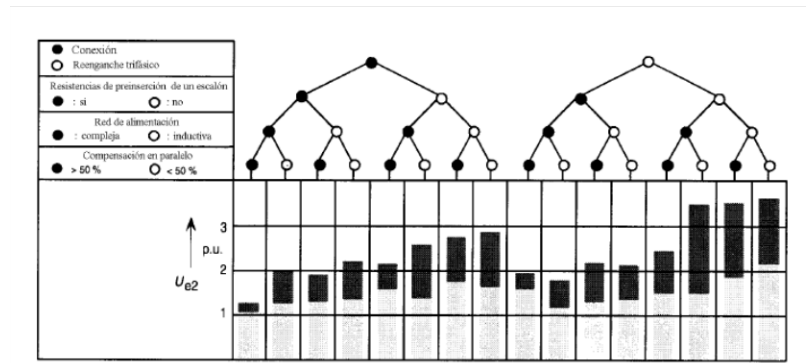


Figura 1.8. Rango del 2% de los sobrevoltajes de frente lento en el extremo de recepción ocasionadas por la conexión y reenganche de la línea [2].

Para el cálculo del voltaje representativo fase-tierra se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{et} = (1.25 \cdot U_{e2} - 0.25) \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{3}} \quad (1.7)$$

De la ecuación 1.7:

U_{e2} : Valor del sobrevoltaje fase-tierra con una probabilidad del 2% de ser excedida.

U_s : Voltaje eficaz (voltaje aplicado a equipos).

La distribución de sobrevoltajes de frente lento entre fases se determina a partir U_{e2} obtenido en los sobrevoltajes fase-tierra, mostrando un rango de posibles relaciones entre los valores 2% entre fases y fase-tierra como se muestra en la Figura 1.9. El límite superior del rango se aplica a los sobrevoltajes de reconexión trifásica, el límite inferior se aplica a sobrevoltajes de conexión trifásica.

Para obtener el valor de U_{p2} se debe colocar el valor máximo y mínimo de U_{e2} en el eje de las x, trazando una recta vertical y horizontal para obtener la relación de

$\frac{U_{p2}}{U_{e2}}$, con los valores obtenidos para cada caso se realiza el promedio obteniendo el valor de U_{p2} .

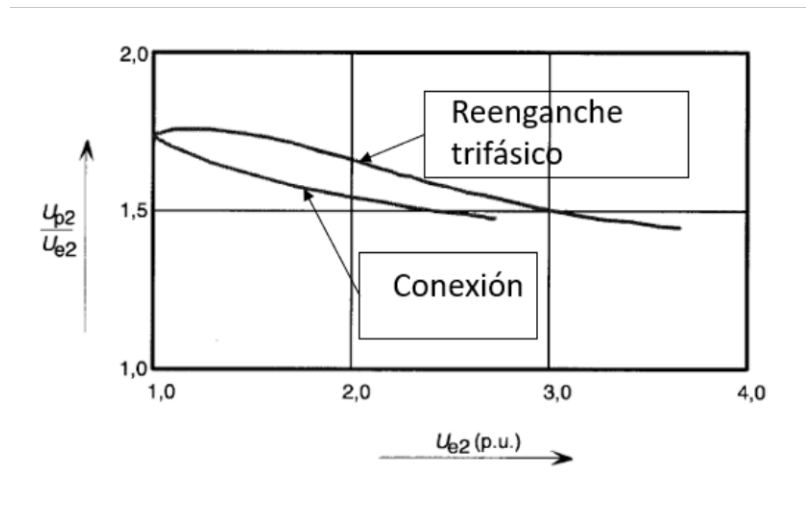


Figura 1.9. Relación entre los valores del 2% de sobrevoltajes de frente lento entre fase-fase y fase-tierra [2].

Para el cálculo del voltaje representativo fase-fase se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{et} = (1.25 \cdot U_{e2} - 0.43) \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{3}} \quad (1.8)$$

En la ecuación 1.8:

U_{p2} : Valor del sobrevoltaje fase-fase con una probabilidad del 2% de ser aumentada.

U_s : Voltaje eficaz fase-fase (voltaje aplicado a equipos).

Sobrevoltajes de frente rápido

Esta clase de sobrevoltajes se genera por descargas atmosféricas, las cuales se originan externamente, en general, por rayos.

Generalmente, para calcular los sobrevoltajes representativos de frente lento se usa el método simplificado, que lleva inmediatamente a los voltajes soportados de coordinación (etapa 2), sin necesidad de obtener un voltaje representativo en esta etapa.

1.4.4.2 Etapa 2: Cálculo de los voltajes soportados de coordinación (U_{cw})

Para determinar los voltajes soportados de coordinación, es necesario convertir los voltajes a las condiciones adecuadas, multiplicando los voltajes soportados representativos con factores que compensen las diferencias entre las pruebas de voltaje estándar y las condiciones de servicio reales dentro del aislamiento [8].

Sobrevoltajes temporales

En este tipo de sobrevoltajes, el voltaje soportado de coordinación es igual al voltaje representativo. Es decir que el factor de coordinación es igual a la unidad ($K_c = 1$).

Para el cálculo del voltaje soportado de coordinación fase-tierra se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{cw(f-t)} = K_c \cdot U_{rp}(f-t) \quad (1.9)$$

En la ecuación 1.9:

U_{rp} : Sobrevoltaje representativo.

K_c : Factor de coordinación.

Para el cálculo del voltaje soportado de coordinación entre fases se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{cw(f-f)} = K_c \cdot U_{rp}(f-f) \quad (1.10)$$

En la ecuación 1.10:

U_{rp} : Sobrevoltaje representativo.

K_c : Factor de coordinación.

Sobrevoltajes de frente lento

Los voltajes soportados de coordinación para sobrevoltajes de frente lento se calculan al multiplicar los sobrevoltajes representativos por el factor de coordinación determinístico K_{cd} , el cual se obtiene mediante la relación entre el nivel de protección al impulso tipo maniobra U_{ps} del pararrayos y el valor del sobrevoltaje fase-tierra U_{e2} , como se observa en la Figura 1.10 [2].

Para los equipos que no están protegidos por pararrayos, el sobrevoltaje máximo previsto es igual al valor de truncamiento (U_{et} o U_{pt}), por lo tanto, el factor de coordinación determinista es $K_{cd} = 1$ [2].

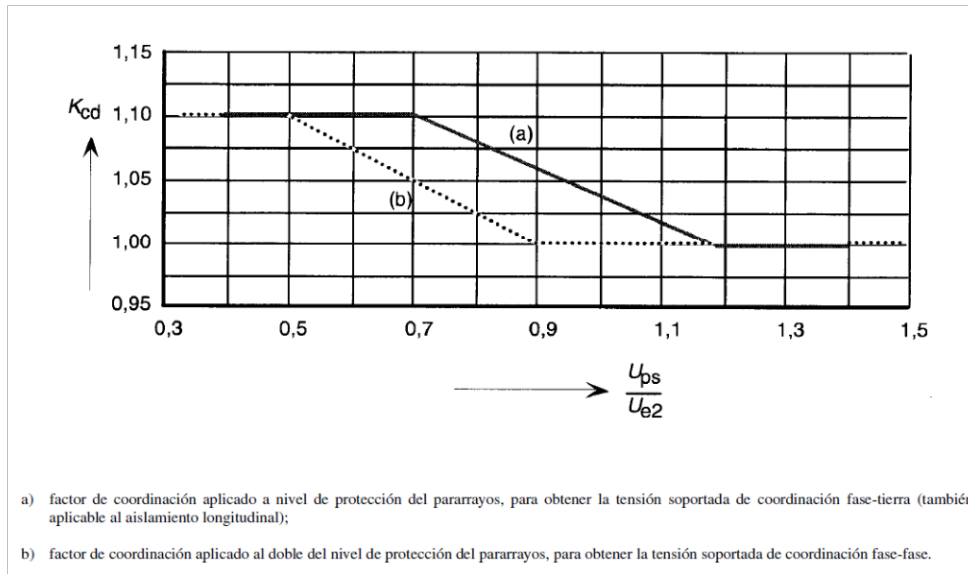


Figura 1.10. Evaluación del factor de coordinación determinista K_{cd} [2].

Para calcular la magnitud del factor de coordinación determinista K_{cd} fase-tierra y fase-fase se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \rightarrow K_{cd(f-t)} \quad (1.11)$$

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \rightarrow K_{cd(f-f)} \quad (1.12)$$

En la ecuación 1.11 y 1.12:

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

U_{e2} : Valor del sobrevoltaje fase-tierra con una probabilidad del 2% de ser excedida.

K_{cd} : Factor de coordinación determinista.

Una vez obtenido el valor del factor determinista K_{cd} , para calcular el voltaje soportado de coordinación entre fases y fase-tierra se tiene las siguientes ecuaciones:

$$U_{cw(f-t)} = K_{cd(f-t)} \cdot U_{rp} \quad (1.13)$$

$$U_{cw(f-f)} = K_{cd(f-f)} \cdot U_{rp} \quad (1.14)$$

En la ecuación 1.13 y 1.14 :

U_{rp} : Voltaje representativo.

K_{cd} : Factor de coordinación determinista.

Sobrevoltajes de frente rápido

Para calcular los sobrevoltajes de frente rápido (tipo rayo) se emplea el método estadístico simplificado, el cual consiste en analizar el número de fallas del aislamiento durante el servicio. Las fallas en los sistemas se pueden tener diferentes consecuencias, teniendo en cuenta estas consideraciones, se analiza el criterio del comportamiento del aislamiento en base a una tasa de falla admisible R_a [2].

Para calcular los voltajes soportados de coordinación para aislamiento interno y externo se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} + \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (1.16)$$

En la ecuación 1.16:

U_{pl} : El nivel de protección de la onda tipo rayo del pararrayos en kV.

A: Factor que caracteriza el comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada a la subestación dado en la tabla 1.2.

n: El número de líneas aéreas conectadas a la subestación ($n = 1$ o $n = 2$).

L: Distancia de separación, donde el valor de L se encuentra a detalle en la fig.3 en la norma IEC 60071-2.

L_{sp} : La longitud del vano en metros.

L_a : Longitud de la línea aérea correspondiente a una tasa de defecto igual a la tasa de fallos aceptable, donde:

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad 1.17$$

En la ecuación 1.17:

R_{km} : La tasa de defecto anual de una la línea aérea (fallas/año/km).

R_a : Es la tasa de fallos aceptable de los equipos (falla/año).

Tabla 1.2. Factor A para varias líneas aéreas [2].

Tipo de línea	A (kV)
Líneas de distribución (cebados entre fases):	
Con las crucetas puestas a tierra	900
Líneas con apoyos de madera	2700
Líneas de transporte (cebados fase-tierra):	
Un solo conductor	4500
Doble haz	7000
Cuádruple haz	11000
Haz de 6 u 8 conductores	17000

Los sobrevoltajes de frente rápido afectan de la misma manera a los aislamientos fase-fase y fase-tierra.

1.4.4.3 Etapa 3: Cálculo de los voltajes soportados requeridos (U_{rw})

Para calcular los voltajes soportados requeridos U_{rw} , se convierten los voltajes soportados de coordinación U_{cw} aplicando factores de corrección, con la finalidad de compensar las condiciones reales de servicio y la de ensayos normalizados [1].

Para la compensación de las condiciones atmosféricas y los efectos restantes se tienen los siguientes factores [2]:

K_s : Factor de seguridad, que considera condiciones de equipamiento.

K_a : Factor de corrección atmosférico, que considera la altitud de la instalación.

Factor de seguridad (K_s)

Al multiplicar por el factor K_s compensa las diferencias entre las condiciones reales y las de prueba. Para el aislamiento externo, este se multiplica también por el factor de corrección atmosférico K_a el cual toma en cuenta las condiciones ambientales de servicio y las normalizadas [2].

El factor de seguridad es aplicable a cualquier tipo de sobrevoltajes, temporales, frente lento o frente rápido para fase-tierra y fase-fase.

Aislamiento interno $K_s = 1.15$.

Aislamiento externo $K_s = 1.05$.

Factor de corrección atmosférico (K_a)

El factor de corrección K_a también conocido como corrección por altitud, se basa en la variación de la presión atmosférica en función de la altitud sobre el nivel del mar. Solo se aplica al aislamiento externo y su valor depende del valor de m y H [2].

Para el cálculo del factor de corrección K_a se tiene la siguiente ecuación:

$$K_a = e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)} \quad 1.18$$

En la ecuación 1.18:

H : Es la altura sobre el nivel del mar.

m : Su valor es igual a 1 para los voltajes soportados de coordinación tipo rayo.

m : Se calcula en base a la Figura 1.11 para los voltajes soportados de coordinación tipo maniobra.

m : Su valor es igual a 1 para los voltajes soportados a frecuencia industrial de las distancias en el aire y aisladores limpios.

Para aisladores contaminados a frecuencia industrial el valor de m puede variar desde 0.5 para aisladores normales hasta 0.8 para los antiniebla [2].

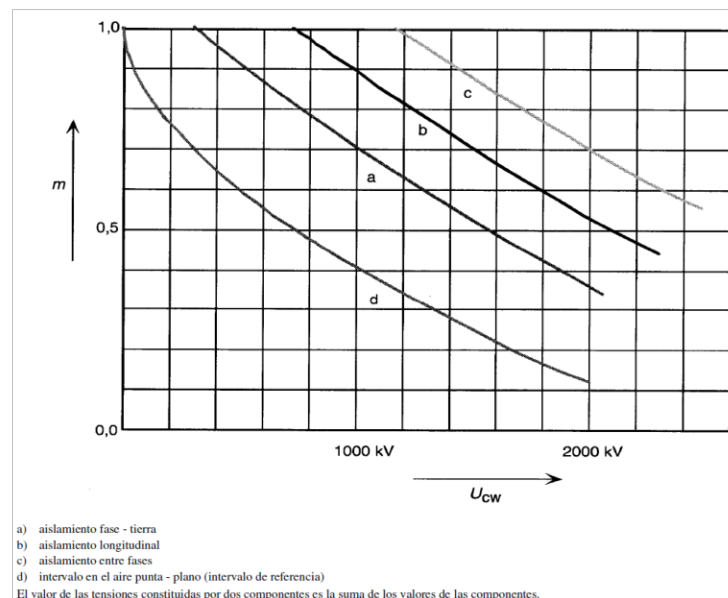


Figura 1.11. Relación entre el exponente m y el voltaje soportado de coordinación a impulsos tipo maniobra [2].

Para el cálculo de los voltajes soportados requeridos para aislamiento interno entre fase-tierra y fase-fase se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \quad (1.19)$$

En la ecuación 1.19:

U_{cw} : Voltaje soportado de coordinación.

K_s : Factor de seguridad.

Para el cálculo de los voltajes soportados requeridos para aislamiento externo entre fase-tierra y fase-fase se tiene la siguiente ecuación:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot k_s \cdot k_a \quad (1.20)$$

En la ecuación 1.20:

U_{cw} : Voltaje soportado de coordinación.

K_s : Factor de seguridad.

K_a : Factor de corrección atmosférica.

1.4.4.4 Etapa 4: Selección del voltaje tolerable normalizado

Los voltajes soportados asignados normalizados se relacionan con los voltajes más elevados del material según el anexo III para sistemas tipo I. Estos voltajes soportados asignados normalizados son válidos para condiciones ambientales normales y se ajustan a las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas [2].

Para sistemas tipo I, el nivel de aislamiento viene dado por un conjunto de valores de voltajes a frecuencia industrial y tipo rayo como se observa a más detalle en el anexo III, previo a la selección del nivel de aislamiento normalizado se debe corregir mediante factores de ensayo a los valores de voltajes soportados especificados para frente lento obtenidos en la etapa 3 con el fin de llegar a un conjunto equivalente de valores a frecuencia industrial y tipo rayo.

Además, para obtener los valores de voltaje entre fase-fase y fase-tierra tanto para aislamiento externo como internos convertidos a sobrevoltajes temporales y tipo rayo, a partir de los sobrevoltajes de maniobra considerando el tipo de aislamiento; se tiene las siguientes formulas en base al anexo V:

Conversión del voltaje soportado de corta duración al voltaje a frecuencia industrial (SDW)

Para aislamiento externo

$$SDW_{(f-t)} = \left(0.6 + \frac{U_{rw}}{8500}\right) \cdot U_{rw} \quad 1.21$$

En la ecuación 1.21:

U_{rw} : Voltaje soportado de coordinación.

$$SDW_{(f-f)} = \left(0.6 + \frac{U_{rw}}{12700}\right) \cdot U_{rw} \quad 1.22$$

En la ecuación 1.22:

U_{rw} : Voltaje soportado de coordinación.

Para aislamiento interno

$$SDW_{(f-t) \text{ ó } (f-f)} = 0.5 \cdot U_{rw} \quad 1.23$$

En la ecuación 1.23:

U_{rw} : Voltaje soportado de coordinación.

*El valor multiplicado a U_{rw} puede variar, y dicho valor depende de las características del aislamiento interno.

Conversión al voltaje soportado a impulso tipo rayo (LIW)

Para aislamiento externo

$$LIW_{(f-t)} = \left(1.05 + \frac{U_{rw}}{6000}\right) \cdot U_{rw} \quad 1.24$$

En la ecuación 1.24:

U_{rw} : Voltaje soportado de coordinación.

$$LIW_{(f-f)} = \left(1.05 + \frac{U_{rw}}{9000}\right) \cdot U_{rw} \quad 1.25$$

En la ecuación 1.25:

U_{rw} : Voltaje soportado de coordinación.

Para aislamiento interno

$$LIW_{(f-t) \text{ ó } (f-f)} = 1.10^* \cdot U_{rw} \quad 1.26$$

En la ecuación 1.26:

U_{rw} : Voltaje soportado de coordinación.

*El valor multiplicado a U_{rw} puede variar, y dicho valor depende de las características del aislamiento interno.

Selección de los voltajes normalizados (U_w)

Para seleccionar los niveles de aislamiento normalizados se elige un conjunto de voltajes soportados estandarizados (U_w), que corresponden al sistema con voltajes máximos (U_m) del anexo III, asegurando cualquier tipo de aislamiento externo o interno entre fases y fase-tierra [3].

Para un resumen más detallado se muestra el anexo I, donde se encuentra un detalle más resumido del procedimiento para la coordinación de aislamiento y el anexo II donde se indica la selección de los voltajes requeridos.

2 METODOLOGÍA

Con la finalidad de realizar un análisis comparativo entre las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.2, en el presente capítulo se desarrollan dos ejemplos del procedimiento para la coordinación de aislamiento el cual es aplicado a dos modelos teóricos, detallando los cálculos matemáticos con el fin de obtener niveles adecuados de aislamiento, según lo establece la norma IEC.

2.1 EJEMPLO 1: SISTEMA CON VOLTAJE NOMINAL DE 230 KV

El ejemplo de coordinación de aislamiento se realiza al sistema que muestra en la Figura 2.1, se trata de un sistema de transferencia conformado por 2 subestaciones ambas con un voltaje nominal de 230 kV y neutro rígido a tierra, el proceso de coordinación de aislamiento se aplica a la subestación 1 cuyas líneas de alimentación se conectan a la barra de la subestación 2, el sistema además cuenta con un transformador y un pararrayos. La subestación presenta características como se observa en la Tabla 2.1:

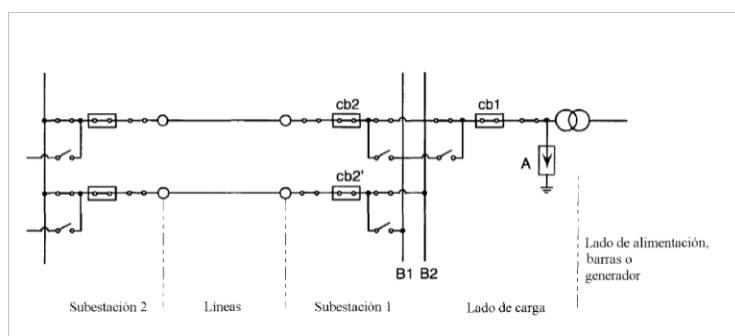


Figura 2.1. Ejemplo 1: Esquema de la disposición de la subestación utilizada para localizar solicitaciones de los sobrevoltajes [2].

Tabla 2.1. Datos para el ejemplo numérico tipo I de 230 kV.

Características	Valores	Unidades
Voltaje nominal (U_m)	230	[kV]
Voltaje eficaz fase-fase (U_s)	245	[kV]
Línea de fuga	25	[mm/kV]
Altura (H)	1000	[m]
Tasa de falla (R_a)	1/400	[año]
Distancia para el aislamiento interno (L_{int})	30	[m]
Distancia para el aislamiento externo (L_{ext})	60	[m]
Factor A (un solo conductor)	4500	-
Vano (L_{sp})	300	[m]
Nivel de contaminación	III (Fuerte)	-
Tipo de neutro	Rígido a tierra	-

Los cálculos correspondientes a cada una de las etapas del procedimiento de coordinación de aislamiento se muestran a continuación:

2.1.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES A FRECUENCIA INDUSTRIAL Y SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS (URP)

2.1.1.1 Sobrevoltajes a frecuencia industrial

Dentro del proceso para la coordinación de aislamiento, el voltaje que es considerado como el más importante es el de servicio continuo máximo (fase-fase) U_s ya dicho voltaje es el que se asignara a los equipos.

Para el ejemplo, el voltaje nominal corresponde a 230 kV, con una variación máxima permitida del 5%, con lo que se obtiene un voltaje máximo de 241.5 kV; normalizando este valor con base al anexo III y a la ecuación 1.1, se tiene que el voltaje de operación continua U_s es igual al voltaje máximo:

$$U_s = U_m = 245 \text{ [kV]}$$

2.1.1.2 Sobrevoltajes temporales

Para el cálculo de sobrevoltajes representativos, se consideran: Sobrevoltajes temporales y para fines de ejemplo de aplicación de la norma, se consideran como representativos los sobrevoltajes de frente lento (los cuales luego deberán ser convertidos a tipo temporal y frente rápido). Si bien se consideran sobrevoltajes de frente rápido generados por descargas atmosféricas, para su cálculo se utiliza la aproximación estadística simplificada, lo que conduce directamente a la etapa dos (cálculo de voltajes soportados de coordinación).

Para determinar los sobrevoltajes temporales por fallas monofásicas se considera el tipo de neutro del sistema, y para los sobrevoltajes por rechazo de carga, se tomarán los resultados de simulaciones¹ que analizan los sobrevoltajes generados ante tal situación.

Sobrevoltajes por falla a tierra

Para la determinación de estos sobrevoltajes, se toma en consideración que básicamente podrían aparecer fallas monofásicas a tierra, las cuales podrían simularse y analizarse en software para determinar su máxima amplitud en p.u., sin embargo, para este caso de estudio al tratarse de un modelo teórico según el tipo de neutro, en función la Tabla 1.1, se

¹ Para efectos de desarrollo del ejemplo se toman directamente los resultados de las simulaciones presentados en la norma, ya que el desarrollo del estudio de falla y rechazo de carga no son parte del alcance de este trabajo.

determina que el factor de falla a tierra k , podría alcanzar el valor de 1.4 p.u, por lo tanto, con base a la ecuación 1.2, se tiene que el valor del voltaje representativo por fallas a tierra es:

$$U_{rp}(f - t) = 1.4 \cdot \frac{245 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 198 \text{ [kV]}$$

Sobrevoltajes por pérdida de carga

Los sobrevoltajes debidos a la pérdida de carga afectan a los aislamientos entre fases y fase-tierra, por lo tanto, se calcularán los sobrevoltajes para ambas condiciones, y para el efecto, se toma como dato de entrada los resultados de estudios que han determinado que por esta condición los sobrevoltajes que aparecen se limitan a magnitudes de 1.4 p.u en la subestación 1.

En base a la ecuación 1.5, se tiene que el valor del voltaje representativo fase-tierra por pérdida de carga es:

$$U_{rp}(f - t) = 1.4 \cdot \frac{245 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 198 \text{ [kV]}$$

En base a la ecuación 1.6, se tiene que el valor del voltaje representativo fase-fase por pérdida de carga es:

$$U_{rp}(f - f) = 1.4 \cdot 245 \text{ kV} = 343 \text{ [kV]}$$

A partir de los resultados obtenidos, se determina que los sobrevoltajes representativos de tipo temporal serán los valores más altos obtenidos frente a las dos situaciones: Fallas a tierra y pérdida de carga.

Tabla 2.2. Sobrevoltajes representativos de tipo temporal.

Sobrevoltajes representativos (U_{rp})	Voltaje [kV]
Fase- tierra (f – t)	198
Fase-fase (f – f)	343

2.1.1.3 Sobrevoltajes de frente lento

Para calcular los sobrevoltajes representativos, es necesario diferenciar los equipos en la entrada de la línea, los cuales pueden verse afectados de forma directa por maniobras como la conexión o renganche en las líneas, y el resto de los equipos en general pueden verse afectados de forma indirecta por estos sobrevoltajes y otro tipo de solicitaciones.

Sobrevoltajes que afectan al equipo instalado a la entrada de la línea de la subestación 1

Cálculo de U_{e2} para fase-tierra

Se toma en cuenta que los estudios de red han demostrado que la reconexión de las líneas en la subestación 2 afectan a la subestación 1, por lo tanto, en base a la información proporcionada y la recomendación de la norma IEC 60071-2 se hace el uso de la Figura 2.2 la cual consiste en analizar maniobras para el ejemplo, que en este caso se trata de un reenganche trifásico, sin resistencias de preinserción, con red de alimentación inductiva y compensación en paralelo menor al 50 %. Obteniendo de este análisis el valor máximo y mínimo U_{e2} , para posteriormente obtener el promedio entre estos valores, como se muestra en la Figura 2.2.

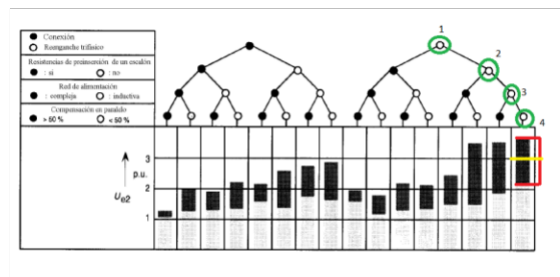


Figura 2.2. Ejemplo de cálculo del valor de los sobrevoltajes fase-tierra según el método fase-cresta (extremo remoto- entrada de la línea).

A continuación, la Tabla 2.3 resume los valores obtenidos para U_{e2} por el método fase-cresta.

Tabla 2.3. Resumen de sobrevoltajes representativos de frente lento U_{e2} .

Sobrevoltajes representativos de frente lento			
Fase-tierra (Entrada de la línea)	U_{e2}		3.7 (máximo)
Fase-tierra (Mínimo)	U_{e2}		2.3 (mínimo)
Fase-tierra (Otros equipos)	U_{e2}		3 (promedio máx y min)

En base a la ecuación 1.7, se tiene que el valor del sobrevoltaje representativo de frente lento fase-tierra en kV:

$$u_{et} = (1.25 \cdot 3 - 0.25) \cdot 245 \text{ kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 700 \text{ [kV]}$$

Cálculo de U_{p2} para fase-fase

Para el cálculo de sobrevoltajes representativos fase-fase se debe analizar la Figura 2.3 de la siguiente manera: Al tratarse de un reengache trifasico se debe colocar el valor máximo y el mínimo de U_{e2} en el eje de las x, luego de lo cual se traza una recta horizontal en la curva superior para obtener la relación de $\frac{U_{p2}}{U_{e2}}$, de manera que se obtiene el valor de U_{p2} .

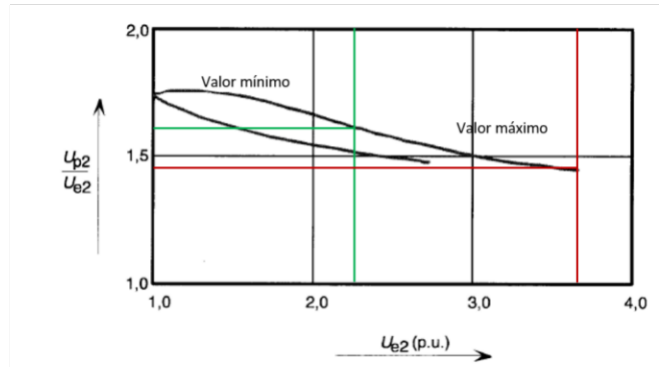


Figura 2.3. Ejemplo de cálculo de U_{p2} .

Tabla 2.4. Resumen de sobrevoltajes representativos de frente lento U_{p2} .

Sobrevoltajes representativos de frente lento		
Fase-tierra (Extremo remoto*)	U_{p2}	1.48*3.7 (máximo)
Fase-tierra (Mínimo)	U_{p2}	1.6*2.3(mínimo)
Fase-tierra (Extremo loca**1)	U_{p2}	1.5*3=4.5 (promedio max y min)

En base a la ecuación 1.8, se tiene que el valor del sobrevoltaje representativo de frente lento fase-fase en :

$$u_{pt} = (1.25 \cdot 4.5 - 0.43) \cdot 245 \text{ kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1039 \text{ [kV]}$$

Sobrevoltajes que afectan a otros equipos en la subestación 1

Los equipos instalados en la subestación 1 se encuentran sometidos a sobrevoltajes de frente lento originados por la conexión y reconexión local. Sin embargo, los sobrevoltajes en la subestación donde se da la maniobra son menores a los de la subestación remota, de tal manera que se realiza el cálculo de sobrevoltajes para fase-tierra y fase-fase.

Cálculo de U_{e2} para fase-tierra

Dado que la subestación 1 está sometida a conexión y reenganche local se tiene dos casos en el que se obtiene el mismo valor de U_{e2} , el primero se trata de un reenganche trifásico, sin resistencias de preinserción, con red de alimentación compleja y compensación en paralelo mayor al 50 % y para el segundo caso la variación es que se trata de una conexión.

De tal manera que de la Figura 2.4 se obtiene el valor máximo y mínimo U_{e2} , para posteriormente obtener el promedio entre estos valores.

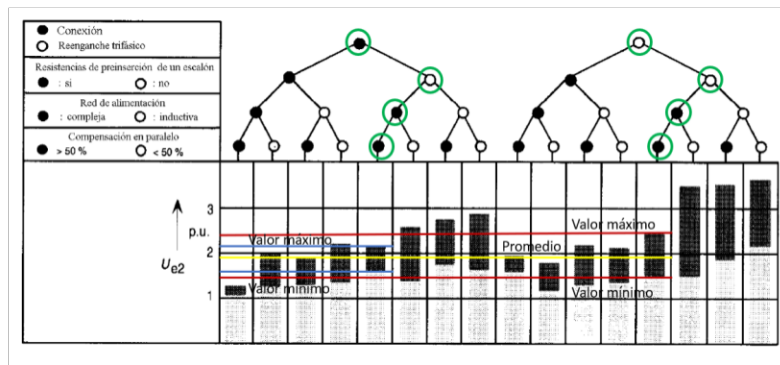


Figura 2.4. Ejemplo de cálculo del valor de los sobrevoltajes fase-tierra según el método fase-cresta (extremo remoto- entrada de la línea).

A continuación, la Tabla 2.5 resume los valores obtenidos para U_{e2} por el método fase-cresta.

Tabla 2.5. Resumen de sobrevoltajes representativos de frente lento U_{e2} .

Sobrevoltajes representativos de frente lento			
		Reenganche	Conexión
Fase-tierra (Entrada de la línea)	U_{e2}	2.4 (máximo)	2.1 (máximo)
Fase-tierra (Mínimo)	U_{e2}	1.4 (mínimo)	1.7 (mínimo)
Fase-tierra (Otros equipos)	U_{e2}	1.9 (promedio máx y min)	1.9 (promedio máx y min)

En base a la ecuación 1.7, se tiene que el valor del sobrevoltaje representativo de frente lento fase-tierra en kV:

$$u_{et} = (1.25 \cdot 1.9 - 0.25) \cdot 245 \text{ kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 425 [\text{kV}]$$

Cálculo de U_{p2} para fase-fase

Para el cálculo de sobrevoltajes representativos fase-fase se debe analizar la Figura 2.5 de la siguiente manera: Al tratarse de un reenganche trifásico se debe colocar el valor

maximo y el mínimo de U_{e2} en el eje de las x y trazar una recta horizontal en la curva superior para obtener la relacion de $\frac{U_{p2}}{U_{e2}}$, de manera que se obtiene el valor de U_{p2} .

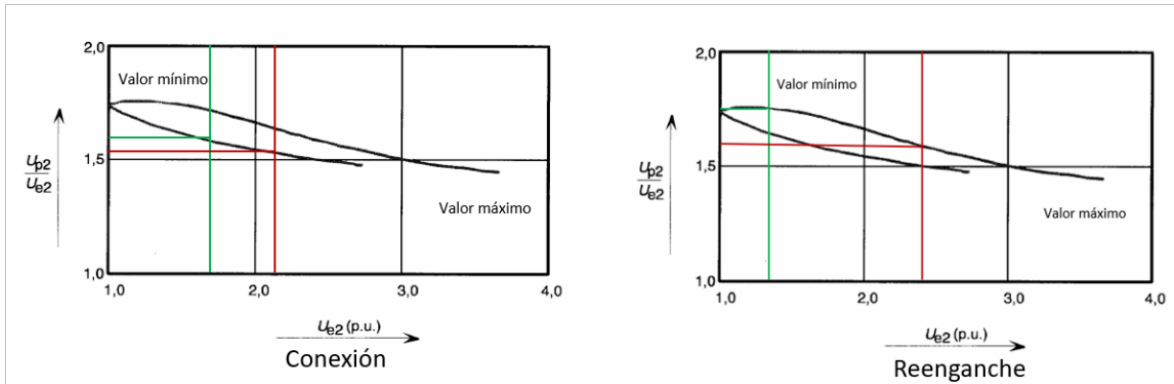


Figura 2.5. Ejemplo de cálculo de U_{p2} para conexión y reenganche.

Tabla 2.6. Resumen de sobrevoltajes representativos de frente lento U_{p2} .

Sobrevoltajes representativos de frente lento			
		Reenganche	Conexión
Fase-tierra (Entrada de la línea)	U_{p2}	2.4*1.53 (máximo)	2.1*1.51 (máximo)
Fase-tierra (Mínimo)	U_{p2}	1.4*1.6 (mínimo)	1.7*1.54 (mínimo)
Fase-tierra (Otros equipos)	U_{p2}	2.9 (promedio máx y min)	2.9 (promedio máx y min)

En base a la ecuación 1.8, se tiene que el valor del sobrevoltaje representativo de frente lento fase-fase en :

$$u_{pt} = (1.25 \cdot 2.9 - 0.43) \cdot 245 \text{ kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 639 \text{ [kV]}$$

Pararrayos a la entrada de línea

Los pararrayos se instalan para controlar los posibles sobrevoltajes de frente lento y rápido que se pueden originar en el sistema. Sus características de protección son las siguientes:

Nivel de protección a impulso tipo maniobra: $U_{ps} = 410 \text{ [kV]}$;

Nivel de protección a impulso tipo rayo: $U_{pl} = 500 \text{ [kV]}$.

Al usar pararrayos, el cálculo de los sobrevoltajes representativos para frente lento puede ser dado directamente por U_{ps} (fase-tierra) o $2U_{ps}$ (fase-fase). Dado el caso en el que estos valores de protección sean inferiores a las solicitaciones máximas correspondientes para el sobrevoltaje de frente lento (u_{et} y u_{pt}) se escoge el mínimo valor entre estos para obtener el valor de los sobrevoltajes representativos, como se muestra en las Tablas 2.7 y 2.8.

Tabla 2.7. Sobrevoltajes representativos para equipo situado en la línea de entrada.

	Nivel de protección al impulso tipo maniobra U_{ps}	Sobrevoltaje de maniobra: Valor de truncamiento U_{et} y U_{pt}	Sobrevoltaje representativo U_{rp}
Fase-tierra	410 [kV]	700 [kV]	410 [kV]
Fase-fase	820 [kV]	1039 [kV]	820 [kV]

Tabla 2.8. Sobrevoltajes representativos para otros equipos.

	Nivel de protección a impulso tipo maniobra U_{ps}	Sobrevoltajes por maniobra: Valor de truncamiento U_{et} y U_{pt}	Sobrevoltaje representativo U_{rp}
Fase-tierra	410 [kV]	425 [kV]	410 [kV]
Fase-fase	639 [kV]	639 [kV]	639 [kV]

2.1.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN (UCW)

Para determinar los voltajes soportados de coordinación, es necesario convertir los voltajes a las condiciones adecuadas, multiplicando los voltajes soportados representativos con factores que compensen las diferencias entre las pruebas de voltaje estándar y las condiciones de servicio reales dentro del aislamiento [8].

2.1.2.1 Sobrevoltajes temporales

En el análisis de estos sobrevoltajes se considera que el voltaje soportado de coordinación es el mismo que el voltaje representativo tipo temporal. En otros términos, el valor del factor de coordinación es igual a 1 ($K_c = 1$), por lo tanto, en base a la ecuación 1.9 y 1.10, se tiene que el valor del voltaje soportado de coordinación por tipo temporal fase-tierra y fase-fase es:

$$U_{cw}(f-t) = K_c \cdot U_{rp}(f-t) = 198 \text{ kV}$$

$$U_{cw}(f-f) = K_c \cdot U_{rp}(f-f) = 343 \text{ kV}$$

2.1.2.2 Sobrevoltajes de frente lento

Para el cálculo de los voltajes soportados de tipo frente lento se utiliza una aproximación estadística, donde se debe tener en cuenta que la limitación de los sobrevoltajes por medio de pararrayos distorsiona la distribución estadística de los sobrevoltajes, creando considerables deformidades en la distribución de los sobrevoltajes cerca del nivel de protección de los pararrayos [2]. Por lo que, pequeños errores relacionados con las características de protección del pararrayos o el rendimiento de los equipos pueden dar lugar a un incremento anormal de la tasa de fallos. La Figura 2.6 toma en consideración este efecto aplicando un factor de coordinación determinista K_{cd} para obtener el valor de U_{rw} [2].

De manera que, para obtención del valor de K_{cd} se logra mediante la relación entre (U_{ps}/U_{e2}) por lo tanto, se convierte los valores de voltaje de truncamiento de frente lento a kV de la siguiente manera:

Sobrevoltajes que afectan al equipo ubicado a la línea de entrada

$$U_{e2} = 3 \cdot 245\text{kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 600 \text{ [kV]}$$

$$U_{p2} = 4.5 \cdot 245\text{kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 900 \text{ [kV]}$$

Sobrevoltajes que afectan a todos los equipos

$$U_{e2} = 1.9 \cdot 245\text{kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 380 \text{ [kV]}$$

$$U_{p2} = 2.9 \cdot 245\text{kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 580 \text{ [kV]}$$

Una vez obtenidos los valores de U_{e2} y U_{p2} en kV, se procede a calcular la relación de $\frac{U_{ps}}{U_{e2}}$ (fase-tierra) y $\frac{U_{ps}}{U_{p2}}$ (fase-fase) en base a las ecuaciones 1.11 y 1.12:

Para el equipo ubicado a la entrada de línea:

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{410}{600} = 0.68 \text{ de la figura 18 el valor de } K_{cd} = 1.10 \text{ (fase - tierra)}$$

$$\frac{2U_{ps}}{U_{p2}} = \frac{820}{900} = 0.91 \text{ de la figura 18 el valor de } K_{cd} = 1.00 \text{ (fase - fase)}$$

Para cualquier equipo excepto a la entrada:

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{410}{380} = 1.08 \text{ de la figura 18 el valor de } K_{cd} = 1.03 \text{ (fase - tierra)}$$

$$\frac{2U_{ps}}{U_{p2}} = \frac{820}{580} = 1.41 \text{ de la figura 18 el valor de } K_{cd} = 1.00 \text{ (fase - fase)}$$

Por lo tanto, el valor del factor determinista K_{cd} se obtiene colocando el valor obtenido de la relación en el eje de las x y trazando una recta horizontal y vertical, para el caso de fase-tierra se toma la curva (a) y para fase-fase la (b), como se muestra en la Figura 2.6.

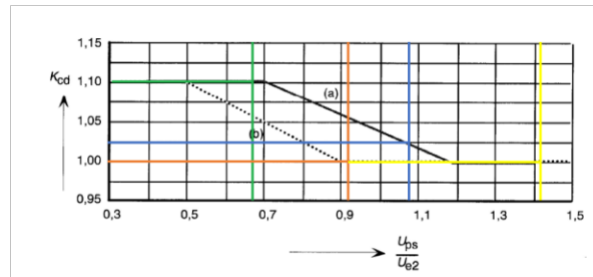


Figura 2.6. Ejemplo de cálculo del factor de coordinación determinista K_{cd} .

Una vez calculado el factor K_{cd} , y en base a la ecuación 1.13 y 1.14 se tiene que el valor del voltaje soportado de coordinación por tipo frente lento para fase-tierra y fase-fase es:

Para equipo ubicado en la entrada de la línea

$$U_{cw}(f-t) = 1.10 \cdot 410 \text{ kV} = 451 \text{ [kV]}$$

$$U_{cw}(f-f) = 1 \cdot 820 \text{ kV} = 820 \text{ [kV]}$$

Para cualquier equipo excepto a la entrada

$$U_{cw}(f-t) = 1.03 \cdot 410 \text{ kV} = 422 \text{ [kV]}$$

$$U_{cw}(f-f) = 1 \cdot 639 \text{ kV} = 639 \text{ [kV]}$$

2.1.2.3 Sobrevoltajes de frente rápido

Para el cálculo de sobrevoltajes de frente rápido se utiliza el método estadístico simplificado, este consiste en analizar la cantidad de fallas del aislamiento durante el tiempo de servicio, por lo tanto, para líneas aéreas la tasa de falla aceptable (R_a) debido a rayos debe estar en el rango de 0.001-0.2 [km/año] (el número mayor corresponde a líneas de distribución) [2].

En base a la ecuación 1.17, se calcula la sección de la línea aérea L_a :

$$L_a = \frac{1/400}{1/100} = 0.25 \text{ [km]} = 250 \text{ [m]}$$

Luego, considerando la distancia de separación del pararrayos (L), el número de líneas que entran a la subestación (n) y la longitud del tramo (L_{sp}), en base a la ecuación 1.16, se tiene que el valor del voltaje soportado de coordinación para aislamiento interno y externo es:

$$U_{cw}(f-t) \text{ y } (f-f) = 500 + \frac{4500}{2} \cdot \frac{30}{300 + 250} = 622 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento interno)}$$

$$U_{cw}(f-t) \text{ y } (f-f) = 500 + \frac{4500}{2} \cdot \frac{60}{300 + 250} = 745 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

Por lo tanto, los sobrevoltajes de frente rápido calculados repercuten de la misma forma en los aislamientos fase-fase y fase-tierra.

2.1.3 ETAPA 3: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS

Los voltajes soportados requeridos especificados se calculan multiplicando el factor de corrección atmosférica K_a y el de seguridad K_s a los voltajes soportados de coordinación obtenidos en la etapa 2.

Factor de seguridad

El factor K_s es aplicado a cualquier sobrevoltaje ya sea temporal, de frente lento o rápido, entre fases o fase-tierra y sus valores son:

Aislamiento interno: $K_s = 1.15$.

Aislamiento externo: $K_s = 1.05$.

Con estos valores de K_s se logra cierta coordinación entre el aislamiento interno y externo. Dando mayor seguridad al aislamiento interno, debido a que este no recupera sus propiedades luego de una descarga disruptiva.

Factor de corrección atmosférica.

El factor K_a es aplicado únicamente al aislamiento externo y su valor es en función de la forma del sobrevoltaje a través del parámetro m en la ecuación 1.18.

2.1.3.1 Sobrevoltajes temporales

Para el voltaje soportado a frecuencia industrial, se requieren pruebas de corta duración en los aisladores que están contaminados de manera que $m = 0.5$, por lo tanto, en base a la ecuación 1.18, el valor del factor de corrección atmosférico para fase-fase y fase-tierra es:

$$K_a = e^{0.5\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.063 \text{ (fase-fase y fase-tierra);}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a las ecuaciones 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-tierra es:

$$U_{rw}(f-t) = 198 \cdot 1.05 \cdot 1.063 \Rightarrow U_{rw} = 221 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-t) = 198 \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 228 \text{ [kV] (aislamiento interno)}$$

De igual manera, en base a las ecuaciones 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-fase es:

$$U_{rw}(f-f) = 343 \cdot 1.05 \cdot 1.063 \Rightarrow U_{rw} = 383 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-f) = 343 \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 395 \text{ [kV] (aislamiento interno)}$$

2.1.3.2 Sobrevoltajes de frente lento

Para el voltaje soportado a impulso tipo maniobra, el valor de m se calcula en función del voltaje soportado de coordinación obtenido en la etapa 2 para sobrevoltajes de frente lento, de tal manera que se coloca el valor de U_{cw} en el eje de las x trazando una recta vertical y horizontal para poder obtener el valor de m , como se muestra en la Figura 2.7.

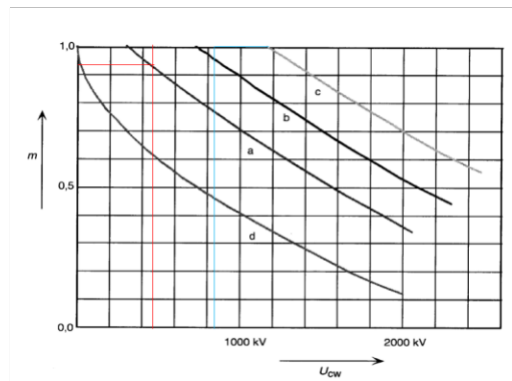


Figura 2.7. Cálculo del valor m para el sistema de 230 kV.

Para fase-tierra:

$$U_{cw} = 451 \text{ [kV] entonces, } m = 0.94.$$

Para fase-fase:

$$U_{cw} = 820 \text{ [kV] entonces } m = 1.$$

Por lo tanto, en base a la ecuación 1.18 el valor del factor de corrección atmosférico para fase-fase y fase-tierra es:

$$K_a = e^{0.94\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.122 \text{ (fase-tierra)}$$

$$K_a = e^{1\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.13 \text{ (fase-fase)}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a la ecuación 1.20 el valor del voltaje soportado especificado para el equipo ubicado en la entrada de la línea es:

$$U_{rw}(f-t) = 451 \cdot 1.05 \cdot 1.122 \Rightarrow U_{rw} = 531 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-f) = 820 \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 973 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

De igual manera, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para cualquier equipo excepto a la entrada es:

$$U_{rw}(f-t) = 422 \cdot 1.05 \cdot 1.122 \Rightarrow U_{rw} = 497 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-f) = 639 \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 758 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-t) = 422 \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 485 \text{ [kV] (aislamiento interno)}$$

$$U_{rw}(f-f) = 639 \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 735 \text{ [kV] (aislamiento interno)}$$

2.1.3.3 Sobrevoltajes de frente rápido

Para valor de m para el voltaje soportado a impulso tipo rayo es uno, por lo tanto, en base a la ecuación 1.18 se tiene que el valor del factor de corrección atmosféricos es:

$$K_a = e^{1\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.13 \text{ (fase-fase y fase-tierra).}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a las ecuaciones 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-tierra es:

$$U_{rw}(f-t) = 745 \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 884 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-t) = 622 \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 715 \text{ [kV] (aislamiento interno)}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-fase es:

$$U_{rw}(f-f) = 745 \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 884 \text{ [kV] (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw}(f-f) = 622 \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 715 \text{ [kV] (aislamiento interno)}$$

2.1.4 ETAPA 4: SELECCIÓN DEL VOLTAJE SOPORTADO NORMALIZADO

Para sistemas tipo I, el nivel normalizado de aislamiento está determinado por un conjunto de valores de voltajes tolerados a frecuencia industrial y voltaje tipo rayo como se observa a más detalle en el anexo III, previo a la selección del nivel de aislamiento normalizado se debe corregir mediante factores de ensayo a los valores de voltajes soportados especificados para frente lento obtenidos en la etapa 3 para obtener un conjunto de valores equivalentes a frecuencia industrial e impulso tipo rayo.

2.1.4.1 Corrección del voltaje soportado de corta duración al voltaje a frecuencia industrial (SDW).

En base a las ecuaciones 1.21 y 1.22, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado de corta duración, por lo tanto, el valor para el equipo ubicado en la entrada de la línea es:

$$SDW(f-t) = 531 \cdot \left(0.6 + \frac{531}{8500}\right) = 352 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

$$SDW(f-f) = 973 \cdot \left(0.6 + \frac{973}{12700}\right) = 658 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

En base a las ecuaciones 1.21, 1.22 y 1.23, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado de corta duración, por lo tanto, el valor para el equipo excepto en la entrada de la línea es:

$$SDW(f-t) = 497 \cdot \left(0.6 + \frac{497}{8500}\right) = 327 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

$$SDW(f-f) = 758 \cdot \left(0.6 + \frac{758}{12700}\right) = 500 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

$$SDW(f-t) = 485 \cdot 0.5 = 243 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento interno)}$$

$$SDW(f-f) = 735 \cdot 0.5 = 368 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento interno)}$$

2.1.4.2 Corrección al voltaje soportado a impulso tipo rayo (LIW).

En base a las ecuaciones 1.25 y 1.26, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado a impulso tipo rayo, por lo tanto, el valor para el equipo ubicado en la entrada de la línea es:

$$LIW(f-t) = 531 \cdot 1.30 = 690 \text{ kV} \text{ (aislamiento externo)}$$

$$LIW(f-f) = 973 \cdot \left(1.05 + \frac{973}{9000}\right) = 1127 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

En base a las ecuaciones 1.25 y 1.26, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado a impulso tipo rayo, por lo tanto, el valor para el equipo excepto en la entrada de la línea es:

$$LIW(f - t) = 497 \cdot 1.30 = 646 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

$$LIW(f - f) = 758 \cdot \left(1.05 + \frac{758}{9000}\right) = 860 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

$$LIW(f - t) = 485 \cdot 1.10 = 534 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento interno)}$$

$$LIW(f - f) = 735 \cdot 1.10 = 808 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento interno)}$$

En la Tabla 2.9 se puede observar el resumen de los voltajes soportados de especificados obtenidos en la etapa 3 y 4 del proceso de coordinación de aislamiento.

Tabla 2.9. Resumen de los voltajes soportados especificados.

Valores de U_{rw} kV		Aislamiento externo				Aislamiento Interno	
		Equipo a la entrada de la línea		Otros equipos			
		$U_{rw}(s)$	$U_{rw}(c)$	$U_{rw}(s)$	$U_{rw}(c)$	$U_{rw}(s)$	$U_{rw}(c)$
Voltaje a frecuencia industrial	Fase-tierra	221	352	221	327	228	243
	Fase-fase	383	658	383	500	395	368
Voltaje tipo maniobra	Fase-tierra	531	–	497	–	485	–
	Fase-fase	973	–	758	–	735	–
Voltaje soportado tipo rayo	Fase-tierra	884	690	884	646	715	534
	Fase-fase	884	1127	884	860	715	808

Finalmente, una vez completada cada una de las etapas se debe comparar la tabla 2.9 con los valores normalizados de voltajes que se encuentran en el anexo III, de manera que se obtiene los valores de voltaje a frecuencia industrial y voltajes soportados al impulso tipo rayo, como se muestra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Voltajes normalizados para el ejemplo 1.

Valores de voltajes normalizados		
	Aislamiento externo [kV]	Aislamiento Interno [kV]
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	395	395
Voltaje soportado a impulso tipo rayo	950 (fase-tierra)	950
	1050 (fase-fase)	

2.2 EJEMPLO 2: SISTEMA CON VOLTAJE NOMINAL DE 24 KV

Para este caso el proceso de coordinación de aislamiento se realiza a un sistema de 24 kV propuesto como ejemplo en la norma IEC 60071-2, el cual consta de una subestación con una barra, un transformador y cuatro interruptores automático como medio de protección de la subestación, la coordinación de aislamiento se realiza en el nodo de conexión de las 4 líneas. La subestación presenta características que observa en la Tabla 2.11:

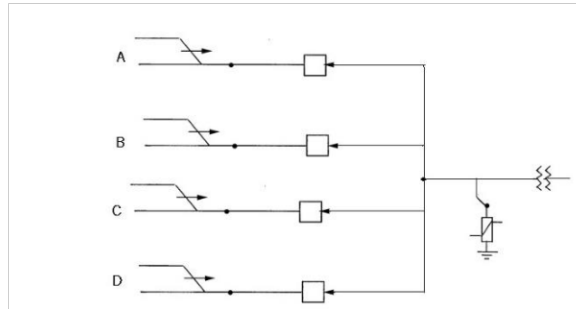


Figura 2.8. Ejemplo 2: Esquema de la disposición de la subestación utilizada para localizar solicitaciones de sobrevoltajes [2].

Tabla 2.11. Datos para el ejemplo numérico para gama I de 24 [kV].

Características	Valores	Unidades
Voltaje nominal	24	[kV]
Voltaje eficaz fase-fase (Us)	24	[kV]
Altura (H)	1000	[m]
Tasa de falla (Ra)	1/400	[año]
Distancia para el aislamiento interno	3	[m]
Distancia para el aislamiento externo	5	[m]
Factor A (cuatro conductores)	2700	[kV]
Vano	100	[m]
Numero de fulminaciones	6×10^{-5}	[m.año]

Los cálculos correspondientes a cada una de las etapas del procedimiento de coordinación de aislamiento se muestran a continuación:

2.2.1 ETAPA 1: CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES REPRESENTATIVOS (URP)

2.2.1.1 Sobrevoltajes a frecuencia industrial

Dentro del proceso para la coordinación de aislamiento, el voltaje que es considerado como el más importante es el de servicio continuo máximo (fase-fase) U_s . Para el ejemplo analizado el voltaje nominal es 24 kV, con el valor de U_m y en base al anexo III, se toma el valor de voltaje normalizado, por lo tanto, con base a la ecuación 1.1, se tiene que el voltaje de servicio continuo máximo tiene un valor de:

$$U_s = U_m = 24 \text{ [kV]}$$

Los sobrevoltajes representativos producidos por defectos a tierra pueden alcanzar en este caso valores entre fase y tierra de 24 kV.

2.2.1.2 Sobrevoltajes temporales

Para el cálculo de sobrevoltajes representativos, se considerarán: Sobrevoltajes temporales y para fines de ejemplo de aplicación de la norma, se considerarán como representativos los sobrevoltajes de frente lento (los cuales luego deberán ser convertidos a tipo temporal y frente rápido). Si bien se considerarán sobrevoltajes de frente rápido generados por descargas atmosféricas, para su determinación se utilizará el método estadístico simplificado, lo que conduce directamente a la etapa dos (cálculo de voltajes soportados de coordinación).

Para determinar los sobrevoltajes temporales por rechazo de carga, se tomarán los resultados de simulaciones² que analizan los sobrevoltajes generados ante tal situación.

Sobrevoltajes por falla a tierra

Dada la práctica de poner el neutro a tierra, los mayores sobrevoltajes fase-tierra son causados por fallas a tierra. Normalmente se alcanza el voltaje de red más elevado. Para este ejemplo, el sobrevoltaje representativo de tipo temporal es el máximo valor esperado que es igual al voltaje más elevado de la red, por lo tanto, se tiene que:

$$U_{rp}(f - t) = U_m = 24 \text{ [kV]}$$

Sobrevoltajes por pérdida de carga

² Para efectos de desarrollo del ejemplo se toman directamente los resultados de las simulaciones presentados en la norma, ya que el desarrollo del estudio de falla y rechazo de carga no son parte del alcance de este trabajo.

Los sobrevoltajes originados por pérdida de carga afectan a los aislamientos entre fases y fase-tierra, por lo tanto, se calcularán los sobrevoltajes para ambas condiciones, y para el efecto, se toma como dato de entrada los resultados de estudios que han determinado que por esta condición los sobrevoltajes que aparecen se limitan a magnitudes de 1.15 p.u [1].

En base a la ecuación 1.5, se tiene que el valor del voltaje representativo fase-tierra por pérdida de carga es:

$$U_{rp}(f - t) = 1.15 \cdot \frac{24\text{kV}}{\sqrt{3}} = 16 \text{ [kV]}$$

En base a la ecuación 1.6, se tiene que el valor del voltaje representativo fase-fase por pérdida de carga es:

$$U_{rp}(f - f) = 1.15 \cdot 24 \text{ kV} = 27.6 \text{ [kV]} \approx 28 \text{ [kV]}$$

A partir de los resultados obtenidos, se determina que los sobrevoltajes representativos de tipo temporal serán los valores más altos obtenidos frente a las dos situaciones: Fallas a tierra y pérdida de carga.

Tabla 2.12. Sobrevoltajes representativos de tipo temporal.

Sobrevoltajes representativos (U_{rp})	Voltaje [kV]
Fase- tierra (f – t)	24
Fase-fase (f – f)	28

2.2.1.3 Sobrevoltajes de frente lento

Cálculo de U_{e2} para fase-tierra

Los estudios de red han mostrado que se trata de un caso con reenganche trifásico de líneas sin resistencia de preinserción, red de alimentación de configuración compleja y compensación en paralelo menor al 50 %. De tal manera que de la Figura 2.9 se obtiene el valor máximo y mínimo U_{e2} , para posteriormente obtener el promedio entre estos valores.

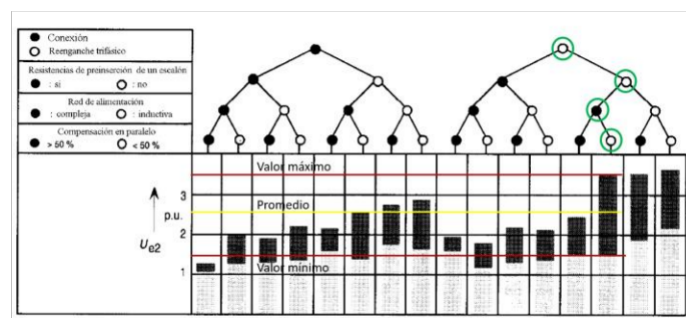


Figura 2.9. Ejemplo de cálculo de U_{e2} .

A continuación, la Tabla 2.13 resume los valores obtenidos de U_{e2} por el método fase-cresta.

Tabla 2.13. Resumen de sobrevoltajes representativos de frente lento U_{e2} .

Sobrevoltajes representativos de frente lento		
Fase-tierra (Entrada de la línea)	U_{e2}	3.6 (máximo)
Fase-tierra (Mínimo)	U_{e2}	1.6 (mínimo)
Fase-tierra (Otros equipos)	U_{e2}	2.6 (promedio máx y min)

Dado que el valor de U_{e2} es igual para ambos casos en base a la ecuación 1.7, se tiene que el valor del sobrevoltaje representativo de frente lento fase-tierra en kV:

$$u_{et} = (1.25 \cdot 2.6 - 0.25) \cdot 24 \text{ kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 58.9 \text{ kV} \approx 59 \text{ kV}$$

Cálculo de U_{p2} para fase-fase

Para el cálculo de sobrevoltajes representativos fase-fase se debe analizar la Figura 2.10 de la siguiente manera: Al tratarse de un reenganche trifásico se debe colocar el valor máximo y el mínimo de U_{e2} en el eje de las x, luego de lo cual se traza una recta horizontal en la curva superior para obtener la relación de $\frac{U_{p2}}{U_{e2}}$, de manera que se obtiene el valor de U_{p2} .

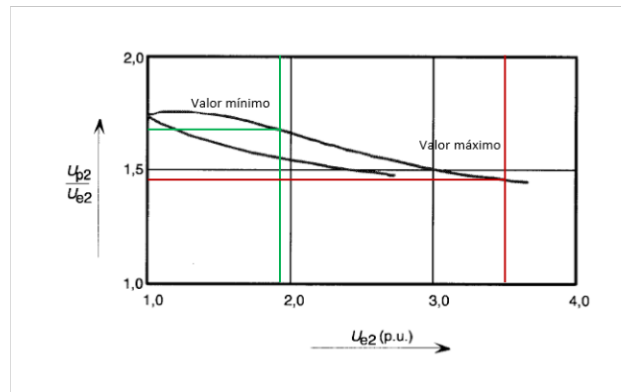


Figura 2.10. Ejemplo de cálculo de U_{p2} .

Tabla 2.14. Resumen de sobrevoltajes representativos de frente lento U_{p2} .

Sobrevoltajes representativos de frente lento		
Fase-tierra (Extremo remoto*)	U_{p2}	1.43*3.6 (máximo)
Fase-tierra (Mínimo)	U_{p2}	1.61*1.6(mínimo)
Fase-tierra (Extremo loca**I)	U_{p2}	3.86 (promedio máx y min)

Dado que el valor de u_{p2} es igual para ambos casos en base a la ecuación 1.8, se tiene que el valor del sobrevoltaje representativo de frente lento fase-fase en kV:

$$u_{pt} = (1.25 \cdot 3.86 - 0.43) \cdot 24 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 86 \text{ kV}$$

Los pararrayos se instalan para controlar los posibles sobrevoltajes que se pueden originar en el sistema, con un nivel de protección a impulso tipo maniobra: $u_{ps} = 80$ [kV];

Al usar pararrayos, el cálculo de los sobrevoltajes representativos de frente lento puede ser dado directamente dadas u_{ps} (fase-tierra) o $2u_{ps}$ (fase-fase). Dado el caso en el que estos valores de protección sean inferiores a las solicitaciones máximas correspondientes para el sobrevoltaje de frente lento (u_{et} y u_{pt}) se escoge el mínimo valor entre estos para obtener el valor de los sobrevoltajes representativos, como se observa en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Sobrevoltajes representativos.

	Nivel de protección al impulso tipo maniobra U_{ps}	Sobrevoltaje de maniobra: Valor de truncamiento U_{et} y U_{pt}	Sobrevoltaje representativo U_{rp}
Fase-tierra	80 [kV]	59 [kV]	59 [kV]
Fase-fase	160 [kV]	86 [kV]	86 [kV]

2.2.2 ETAPA 2: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS DE COORDINACIÓN (UCW)

Para determinar los voltajes soportados de coordinación, es necesario convertir los voltajes a las condiciones adecuadas, multiplicando los voltajes soportados representativos con factores que compensen las diferencias entre las pruebas de voltaje estándar y las condiciones de servicio reales dentro del aislamiento [8].

2.2.2.1 Sobrevoltaje temporales

En el análisis de estos sobrevoltajes se considera que el voltaje soportado de coordinación es el mismo que el voltaje representativo de tipo temporal. En otros términos, el factor de coordinación es igual a uno ($K_c = 1$), por lo tanto, en base a las ecuaciones 1.9 y 1.10, se tiene que el valor del voltaje soportado de coordinación por tipo temporal fase-tierra y fase-fase es:

$$U_{cw}(f - t) = 1 \cdot 24 \text{ kV} = 24 \text{ [kV]}$$

$$U_{cw}(f - f) = 1 \cdot 28 \text{ kV} = 28 \text{ [kV]}$$

2.2.2.2 Sobrevoltajes de frente lento

En este caso el factor de coordinación determinista es $K_{cd} = 1$ dado que el procedimiento de coordinación del aislamiento se aplica a los valores de truncamiento de las distribuciones de los sobrevoltajes. Por lo tanto, para este ejemplo, los valores de los voltajes soportados de coordinación son los mismos que los sobrevoltajes representativos de frente lento:

$$U_{cw}(p - e) = 1 \cdot 59 \text{ kV} = 59 \text{ [kV]}$$

$$U_{cw}(p - p) = 1 \cdot 86 \text{ kV} = 86 \text{ [kV]}$$

2.2.2.3 Sobrevoltaje de frente rápido

Para el cálculo de sobrevoltajes de frente rápido se utiliza el método estadístico simplificado, este consiste en analizar la cantidad de fallas del aislamiento durante el tiempo de servicio, por lo tanto, para líneas aéreas la tasa de falla aceptable (R_a) debido a rayos debe estar en el rango de 0.001-0.2 [km/año] (el número mayor corresponde a líneas de distribución) [2].

En base a la ecuación 1.17, se determina la longitud L_a de la línea aérea con una tasa de falla igual a la tasa aceptable R_a , y su valor es:

$$L_a = \frac{1/400}{6 \times 10^{-5}} = 41.6 \text{ [m]} \approx 42 \text{ [m]}$$

Luego, considerando la distancia de separación del pararrayos (L), el número de líneas que entran a la subestación (n) y la longitud del tramo (L_{sp}), en base a la ecuación 1.16, se tiene que el valor del voltaje soportado de coordinación para aislamiento interno y externo es:

$$U_{cw} = 80 \text{ kV} + \frac{2700}{4} \cdot \frac{3}{100 + 42} = 94 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento interno)}$$

$$U_{cw} = 80 \text{ kV} + \frac{2700}{4} \cdot \frac{5}{100 + 42} = 104 \text{ [kV]} \text{ (aislamiento externo)}$$

2.2.3 ETAPA 3: CÁLCULO DE VOLTAJES SOPORTADOS REQUERIDOS (URW)

Los voltajes soportados requeridos especificados se calculan multiplicando el factor de corrección atmosférica K_a y el de seguridad K_s a los voltajes soportados de coordinación obtenidos en la etapa 2.

Factor de seguridad

El factor K_s es aplicado a cualquier sobrevoltaje ya sea temporal, de frente lento o rápido, entre fases o fase-tierra y sus valores correspondientes son:

Aislamiento interno: $K_s = 1.15$.

Aislamiento externo: $K_s = 1.05$.

Con estos valores de K_s se logra cierta coordinación entre el aislamiento interno y externo. Dando mayor seguridad al aislamiento interno, debido a este no recupera sus propiedades luego de una descarga disruptiva.

Factor de corrección atmosférica.

El factor K_a es aplicado únicamente al aislamiento externo y su valor es en función de la forma del sobrevoltaje a través del parámetro m en la ecuación 1.18.

2.2.3.1 Para los sobrevoltajes temporales

Para el voltaje soportado a frecuencia industrial, se requieren pruebas de corta duración en los aisladores contaminados de manera que $m = 1$, por lo tanto, en base a la ecuación 1.18, el valor del factor de corrección atmosférico para fase-fase y fase-tierra es:

$$K_a = e^{1\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.13 \text{ (fase-fase y fase-tierra);}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-tierra es:

$$U_{rw} = 24 \text{ kV} \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 28 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw} = 24 \text{ kV} \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 28 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

De igual manera, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-fase es:

$$U_{rw} = 28 \text{ kV} \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 33 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw} = 28 \text{ kV} \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 32 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

2.2.3.2 Sobrevoltajes de frente lento

En este tipo de sobrevoltajes, el valor de m depende de U_{cw} , por lo que para valores de U_{cw} menores a 300 kV entre fase-tierra o 1200 kV entre fases el valor de m es igual a 1 ($m = 1.0$). Por lo tanto, en base a la ecuación 1.18 el valor del factor de corrección atmosférico para fase-fase y fase-tierra es:

$$K_a = e^{1\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.13 \text{ (fase-fase y fase-tierra)}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-tierra es:

$$U_{rw} = 59 \text{ kV} \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 70 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw} = 59 \text{ kV} \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 68 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

De igual manera, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-fase es:

$$U_{rw} = 86 \text{ kV} \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 102 \text{ kV(aislamiento externo)}$$

$$U_{rw} = 86 \text{ kV} \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 99 \text{ kV(aislamiento interno)}$$

2.2.3.3 Sobrevoltajes de frente rápido

Para los voltajes soportados a impulso tipo rayo el valor de $m = 1$, por lo tanto, en base a la ecuación 1.18 se tiene que el valor del factor de corrección atmosféricos es:

$$K_a = e^{1\left(\frac{1000}{8150}\right)} = 1.13 \text{ (fase-fase y fase-tierra).}$$

Una vez obtenido el factor de corrección atmosférico, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-tierra es:

$$U_{rw} = 104 \text{ kV} \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 123 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw} = 94 \text{ kV} \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 108 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

De igual manera, en base a la ecuación 1.20 y 1.19 el valor del voltaje soportado especificado para fase-fase es:

$$U_{rw} = 104 \text{ kV} \cdot 1.05 \cdot 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 123 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$U_{rw} = 94 \text{ kV} \cdot 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 108 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

2.2.4 ETAPA 4: SELECCIÓN DEL VOLTAJE SOPORTADO NORMALIZADO

Para sistemas tipo I, el nivel normalizado de aislamiento está determinado por un conjunto de valores de voltajes tolerados a frecuencia industrial y voltaje soportado a impulso tipo rayo como se observa a más detalle en el anexo III, previo a la selección del nivel de aislamiento normalizado se debe corregir mediante factores de ensayo a los valores de voltajes soportados especificados para frente lento obtenidos en la etapa 3 para obtener un conjunto de valores equivalentes a frecuencia industrial e impulso tipo rayo.

2.2.4.1 Corrección al voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial (SDW).

En base a la ecuación 1.23, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado de corta duración, por lo tanto, el valor para fase-tierra es:

$$SDW = 70 \text{ kV} \cdot 0.6 = 42 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$SDW = 68 \text{ kV} \cdot 0.5 = 34 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

En base a la ecuación 1.23, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado de corta duración, por lo tanto, el valor para fase-fase es:

$$SDW = 102 \text{ kV} \cdot 0.6 = 61 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$SDW = 99 \text{ kV} \cdot 0.5 = 50 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

2.2.4.2 Corrección al voltaje soportado a impulso tipo rayo (LIW).

En base a la ecuación 1.26, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado de corta duración, por lo tanto, el valor para fase-tierra es:

$$LIW = 70 \text{ kV} \cdot 1.06 = 74 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$LIW = 68 \text{ kV} \cdot 1.10 = 75 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

En base a la ecuación 1.26, se convierte el voltaje soportado de frente lento a voltaje soportado de corta duración, por lo tanto, el valor para fase-fase es:

$$LIW = 102 \text{ kV} \cdot 1.06 = 108 \text{ kV (aislamiento externo)}$$

$$LIW = 99 \text{ kV} \cdot 1.10 = 109 \text{ kV (aislamiento interno)}$$

Tabla 2.16. Resumen del procedimiento de coordinación de aislamiento para el sistema de 24 kV.

Tipo de sobrevoltaje		Temporal				Frente lento				Frente rápido	
		Fase-tierra		Fase-fase		Fase-tierra		Fase-fase		Fase-tierra y fase-fase	
Aislamiento		Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo
Etapa 1 Cálculo voltajes representativos	Valores de U_{rp}	24 kV	24 kV	28 kV	28 kV	59 kV	59 kV	86 kV	86 kV		
Etapa 2 Cálculo voltajes soportados de coordinación	Valores de U_{cw}	24 kV	24 kV	28 kV	28 kV	59 kV	59 kV	86 kV	86 kV	94 kV	104 kV
Etapa 3 Cálculo voltajes soportados especificados	Valores de U_{rw}	28 kV	28 kV	32 kV	33 kV	68 kV	70 kV	99 kV	102 kV	109 kV	125 kV
Etapa 4 Cálculo voltajes soportados normalizados	1) Factor de conversión de ensayo	Frecuencia industrial A impulso tipo rayo				0.5 1.10	0.6 1.06	0.5 1.10	0.6 1.06		
	2) Voltajes soportados especificados resultantes	Frecuencia industrial Impulso tipo rayo				34 kV 75 kV	42 kV 74 kV	50 kV 109 kV	61 kV 108 kV		
	Selección de los voltajes soportados normalizados	Frecuencia industrial 50 kV								125 kV	

Finalmente, una vez completada cada una de las etapas se debe comparar la Tabla 2.16 con los valores de voltajes normalizados que se encuentran en el anexo III, de manera que se obtiene los valores de voltaje a frecuencia industrial y voltajes al impulso tipo rayo, como se observa en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Voltajes normalizados para el ejemplo 2.

Valores de voltajes normalizados en kV		
	Aislamiento externo	Aislamiento Interno
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	50	50
Voltaje soportado a impulso tipo rayo	125	125

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS EJEMPLOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

3.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS DEL EJEMPLO 1 PARA UN SISTEMA DE 230 KV

El valor de voltaje a frecuencia industrial es de 395 kV y de 950 kV impulso tipo rayo, estos valores de voltaje son dados para un nivel de aislamiento normalizado en un sistema con $U_m=245$ kV, dichos valores abarcan todos los tipos de aislamiento fase a tierra y entre fases a la entrada de la línea. Para el equipo que no se encuentra situado a la entrada de la línea, es necesario considerar las recomendaciones de la norma IEC 60071-2, dado que en este caso para los sobrevoltajes a impulso tipo rayo el aislamiento externo para fase-fase sobrepasa el nivel estándar de 1050 kV a 1127 kV, de manera que se requiere una distancia mínima de separación en el aire para que no se originen descargas entre ellos, por lo tanto, en base al anexo VI, se tiene:

Distancia en el aire mínima entre punta-estructura: 2350 mm

Distancia en el aire mínima entre conductor-estructura: 2200 mm

Cabe señalar que para el aislamiento externo fase-tierra, el valor de voltaje establecido para la prueba de corta duración a frecuencia industrial de 395 kV es superior al valor mínimo requerido por los sobrevoltajes temporales de 221 kV. Sin embargo, el valor de voltaje de 395 kV corresponde al nivel de aislamiento normalizado que tiene un voltaje soportado especificado a impulso tipo rayo de 950 kV, por lo tanto, genera mayor precisión en los estudios debido a que se podría disminuir un poco el nivel de las condiciones relativas al aislamiento externo fase-tierra.

Los niveles de aislamiento normalizados que cubrirán aislamiento interno o externo fase-tierra o entre fases para el ejemplo de cálculo como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Voltajes normalizados para el ejemplo 1.

Valores de voltajes normalizados		
	Aislamiento externo [kV]	Aislamiento Interno [kV]
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	395	395
Voltaje soportado a impulso tipo rayo	950 (fase-tierra) 1050 (fase-fase)	950

3.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL EJEMPLO 2 PARA UN SISTEMA DE 24 KV

El valor de voltaje normalizado a frecuencia industrial es de 50 kV y a impulso tipo rayo es de 125 kV, dichos valores corresponden para un sistema con $U_m=24$ kV, de tal manera que cubren todos los aislamientos para fase-tierra y entre fases.

Los valores tanto para aislamiento externo como interno se encuentran en un rango aceptable con respecto a los valores mínimos obtenidos en la Tabla 2.16, de manera que cubren todas las exigencias relativas de los sobrevoltajes, por ello para el ejemplo de cálculo se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Voltajes normalizados para el ejemplo 2.

Valores de voltajes normalizados		
	Aislamiento externo [kV]	Aislamiento Interno [kV]
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	50	50
Voltaje soportado a impulso tipo rayo	125	125

3.2 ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN ENTRE LAS NORMAS LA NORMA IEC 60071-2 E IEEE STD. C62.82.1.

Con base al análisis de resultados y a la revisión de la bibliografía [1] [2] [7] y [9], en esta sección se realiza un análisis comparativo de las metodologías para la coordinación de aislamiento propuestas por las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1. En la Tabla 3.3, se identifican las principales similitudes y diferencias del procedimiento de cálculo para los sobrevoltajes y factores que son empleados como parte del procedimiento de coordinación de aislamiento de las dos normas, las cuales son analizadas más adelante.

Tabla 3.3. Comparación entre la norma IEE Std C.62.82.1 e IEC 60071-2.

Parámetros/ Cálculos	Norma IEEE Std C62.82.1	Norma IEC 60071-2
Normas empleadas para la coordinación de aislamiento.	La norma se divide en las siguientes partes: <ul style="list-style-type: none"> • Norma IEEE Std C62.82.1-2010: Con definiciones, principios y reglas. • Norma IEEE Std 1313.2-1999: Con una guía de aplicación para la coordinación de aislamiento. 	La norma se divide en las siguientes partes: <ul style="list-style-type: none"> • Norma IEC 60071-1: Con definiciones, principios y reglas. • La norma IEC 60071-2: Con una guía de aplicación para la coordinación de aislamiento.
Rango de voltajes para sistemas tipo I	De 15 kV a 245 kV.	De 1 kV a 245 kV.
Etapas de la coordinación de aislamiento	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.	Etapa 1: Cálculo de sobrevoltajes representativos (urp). Etapa 2: Cálculo voltajes soportados de coordinación (ucw). Etapa 3: Cálculo de voltajes soportados requeridos. Etapa 4: Selección del voltaje soportado normalizado.
Voltajes normalizados	Selecciona voltajes normalizados de baja frecuencia y corta duración y tipo rayo que se encuentran en la tabla 1 de la norma IEEE Std C62.82.1-2010.	Selecciona voltajes normalizados para voltaje a frecuencia industrial de corta duración y voltaje tipo rayo que se encuentran en la tabla 2 de la norma IEC 60071-1.
Cálculo de Sobrevoltajes para la coordinación de aislamiento	La norma considera que para sistemas tipo 1 se deben calcular los siguientes sobrevoltajes: <ul style="list-style-type: none"> • Sobrevoltajes a frecuencia Industrial, considerando eventos de fallas monofásicas. • Sobrevoltajes a impulso tipo rayo, considerando eventos por descargas atmosféricas. 	Para cada tipo de sobrevoltaje identifica sobrevoltajes representativos sobre los cuales se realizará la coordinación. Para el caso de sistemas tipo 1, la norma considera <ul style="list-style-type: none"> • Sobrevoltajes Temporales, considerando pérdidas de carga y fallas a tierra. • Sobrevoltajes de Frente lento (que deben ser convertidos a tipo temporal a través de la tabla 2 en la referencia [2]), considerando eventos por conexión y reenganche de línea. • Sobrevoltajes de Frente rápido, considerando eventos por descargas atmosféricas . Además, se identifican sobrevoltajes a frecuencia industrial, básicamente determinados por los voltajes máximos de operación del sistema.
Métodos de coordinación	Estadístico y determinístico	Estadístico y determinístico.
Nomenclatura de los voltajes	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje soportado (V_3): Son voltajes determinados en base 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrevoltajes representativos (Urp): Se trata de sobrevoltajes que producirían los mismos

determinados para la coordinación	<p>de los resultados de los sobrevoltajes a frecuencia industrial e impulso tipo rayo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sobrevoltaje a frecuencia industrial (V_{PF}): Es el valor máximo de cresta que puede alcanzar el voltaje cuando ocurre una falla. • Sobrevoltaje a impulso tipo rayo (E): Es el valor crítico de flashover que puede alcanzar el voltaje de entrada debido a descargas atmosféricas. • Voltajes soportados especificados por los elementos: Son los voltajes de los equipos de la subestación como transformadores y pararrayos con la finalidad de ajustar o instalar equipos de protección, para que los equipos no sufran daños. • Niveles de aislamiento a impulso tipo rayo: Es el valor de cresta que alcanza un impulso de tipo rayo debido a que determina cuanto puede soportar el sistema ante descargas atmosféricas. 	<p>efectos dieléctricos en el aislamiento que los sobrevoltajes algún tipo dado que ocurren estando en servicio debido a diversos orígenes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje soportado de coordinación (U_{cw}): Para la norma, este es el voltaje soportado por los equipos que cumple con los criterios de diseño en las condiciones de servicio en las que operarán los equipos. • Voltaje soportado requerido (U_{rw}): Voltaje que compensa las diferencias entre la situación normalizada frente a la situación o condiciones ambientales reales de servicio. • Voltaje o nivel normalizado de aislamiento (U_w): Es un conjunto de valores de voltajes normalizados relacionados al voltaje más alto del material.
Factor de falla a tierra (k)	El factor se emplea para el cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial en la etapa 1, su valor depende del tipo de neutro del sistema.	Este factor se emplea para el cálculo de sobrevoltajes temporales, su valor depende del tipo de neutro del sistema.
Factor de espaciamiento (K_g)	Este factor se calcula en la etapa 1 y se emplea para el cálculo del CFO con el cual se determinan los sobrevoltajes a impulso tipo rayo.	Factor no utilizado
Factor de coordinación (K_c)	Factor no utilizado	Este factor se emplea para cálculo de los voltajes soportados de coordinación de tipo temporal en la etapa 2, el cual considera la diferencia entre el voltaje soportado esperado y el sobrevoltaje representativo.
Factor de coordinación determinista (K_{cd})	Factor no utilizado	Este factor se emplea para cálculo de los voltajes soportados de coordinación de tipo frente lento en la etapa 2.

Factor de seguridad	Este factor se emplea para el cálculo del nivel de aislamiento a impulso tipo rayo en la etapa 3, el valor recomendado es de 1.15.	Este factor se emplea para el cálculo de los voltajes soportados especificados de tipo: Temporal, frente rápido y lento. Los valores correspondientes al factor son: K _s =1.05 (aislamiento externo). K _s =1.15 (aislamiento interno).
Corrección atmosférica	La corrección atmosférica se utiliza en etapa 1 para calcular el CFO, en los casos que no se cuenta con datos de condiciones ambientales estándar.	El factor de corrección atmosférica (K _a) se emplea en la etapa 3 para el cálculo de los voltajes soportados especificados de tipo: Temporal, frente rápido y lento.

Del análisis de la tabla anterior se puede extraer que, para el proceso de coordinación de aislamiento, la norma IEEE Std C 62.82.1 considera tres etapas fundamentales:

- Etapa 1: En donde se define y se calculan las principales características de los sobrevoltajes a frecuencia industrial e impulso tipo rayo.
- Etapa 2: En donde en base a cálculos se obtiene el voltaje soportado. Cuando se trata de modelos simplificados como los ejemplos presentados en este trabajo, se considera únicamente el aislamiento para el transformador y pararrayos del sistema;
- Etapa 3: Donde se realiza el cálculo del aislamiento para los equipos del sistema y se selecciona el nivel de aislamiento para voltajes estadísticos soportados del sistema.

Por otra parte, se identifica que la norma IEC considera 4 etapas fundamentales:

- Etapa 1: Se determina los sobrevoltajes más representativos que pueden aparecer en el sistema.
- Etapa 2: Se obtienen los voltajes soportados de coordinación a través de la multiplicación de los factores por los voltajes soportados representativos, dichos factores compensan las diferencias dentro del aislamiento entre los ensayos de voltajes estándar y las condiciones reales de servicio.
- Etapa 3: Esta etapa consiste en convertir los voltajes soportados de coordinación a voltajes soportados requeridos a través de la multiplicación por factores con lo que se obtiene condiciones de ensayos normalizados.
- Etapa 4: Dentro de esta etapa se convierte los sobrevoltajes de frente lento a sobrevoltajes tipo temporal y tipo rayo a través de la tabla 2 de la norma IEC 60071-2, para finalmente escoger los valores del aislamiento normalizado en base a recomendaciones y criterios.

Debe notarse que las normas IEC e IEEE consideran diferentes rangos de voltajes normalizados para sistemas tipo I. La norma IEC 60071-1 abarca un rango mayor que la norma IEEE Std C.62.82.1, la norma IEEE considera valores desde los 15 kV, mientras que la norma IEC considera sistemas desde los 3.6 kV, de tal manera que, al trabajar en un rango menor a 15 kV se puede llegar a sobredimensionar el aislamiento de los equipos.

Para el cálculo de los sobrevoltajes utilizados para la coordinación de aislamiento, la metodología de la norma IEC 60071-2 e IEEE Std C.62.82.1 determina que deben calcularse los sobrevoltajes temporales y frente rápido, considerando eventos de falla y por descargas atmosféricas respectivamente, ya que son los sobrevoltajes más comunes que se pueden presentar en sistemas tipo I. Si bien, en ciertos casos pueden ser relevantes los sobrevoltajes de frente lento, para estos sobrevoltajes la norma IEC 60071-2 determina que estos sobrevoltajes se deben convertir a voltajes normalizados a frecuencia industrial y tipo rayo a través de las ecuaciones que proporciona la misma norma.

Por otro lado, se ha identificado que la norma IEC 60071-2 puede utilizar un método determinístico o estadístico dentro del proceso de coordinación de aislamiento; esto dependerá de los datos que se tengan del sistema; mientras que la norma IEEE Std C.62.82.1 utiliza el método determinístico para el cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial ocasionados por fallas mediante el factor de falla a tierra (k), y el método estadístico para el cálculo de los sobrevoltajes por impulso tipo rayo.

Otra de las diferencias más claras, es el hecho de que cada norma emplea diferente nomenclatura para identificar y definir a los sobrevoltajes dentro la metodología utilizada para la coordinación de aislamiento como se observa en la Tabla 3.3; Así mismo bajo la aplicación de las normas, dentro del proceso para la coordinación de aislamiento se deben realizar ajustes, los cuales dependen del diseño de coordinación, estructura de la subestación, condiciones ambientales y seguridad, para ello se emplean los siguientes factores:

- El factor de falla a tierra es empleado tanto en la norma IEC como en la IEEE, la norma IEEE Std C62.82.1 utiliza el factor para el cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial provocados por fallas a tierra monofásicas, y la IEC 60071-2 para el cálculo de sobrevoltajes temporales provocados por fallas a tierra, en ambos casos el factor K depende del neutro del sistema.
- El factor de espaciamiento (CFO) es utilizado por la norma IEE Std C 62.82.1 para el cálculo de sobrevoltajes a impulso tipo rayo, debido a que en las subestaciones

existen diferentes estructuras, las distancias de los aisladores no son las mismas y no tienen el mismo tipo de conexión.

- El factor de coordinación (K_c) se emplea para el cálculo de los voltajes soportados de coordinación, dichos sobrevoltajes se obtienen mediante la multiplicación del factor por los sobrevoltajes representativos, el factor considera la diferencia entre el voltaje soportado esperado y el sobrevoltaje representativo como lo establece la norma IEC 60071-2.
- El método determinista es empleado para el cálculo de los voltajes máximos solicitados por los equipos y la selección mínima de la rigidez dieléctrica, por lo tanto, el voltaje soportado de coordinación se calcula multiplicando el máximo valor de los sobrevoltajes representativos por el factor de coordinación determinista (K_{cd}), como lo establece la norma IEC 60071-2.
- Dentro del proceso de coordinación de aislamiento se debe tener en cuenta la diferencia entre las condiciones atmosféricas normalizadas y las condiciones operativas esperadas, por tal razón las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1 realizan corrección atmosférica, además se debe tomar en cuenta la altitud del sistema ya que influye directamente en el aislamiento externo. Para efecto, la norma IEC 60071-2 emplea el factor de corrección atmosférica para el cálculo de los voltajes soportados especificados de tipo temporal, frente lento y rápido, mientras que la norma IEEE Std C62.82.1 emplea corrección atmosférica para el cálculo del voltaje Flashover como parte de la obtención de sobrevoltajes a impulso tipo rayo.
- El factor de seguridad es empleado en el proceso de coordinación de aislamiento debido a diversos eventos que se pueden presentar en una subestación tales como el envejecimiento del aislamiento durante la vida útil del equipo, la diferencia en el ensamblaje del material, la calidad de la instalación, etc. Sin embargo, estos eventos no pueden ser evaluados individualmente por lo que se debe aplicar el factor K_s ; la norma IEC establece valores del factor tanto para aislamiento interno como externo, mientras que la norma IEEE considera el mismo valor para los dos casos.

3.2.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DE LA NORMA IEC 60071-2 E IEEE STD C.62.82.1.

Con el fin de complementar el análisis comparativo de las normas IEEE Std. C62.82.1 y la norma IEC 60071-2, se comparan los valores obtenidos para los niveles de aislamiento, obtenidos mediante la aplicación de cada una de las normas, así como los análisis correspondientes.

En las tablas 3.4 y 3.5 se presentan los valores de voltajes normalizados que fueron obtenidos al aplicar el procedimiento para la coordinación de aislamiento en base a las dos normas.

Los voltajes normalizados obtenidos son a frecuencia industrial y a impulso tipo rayo, de tal manera que en las referidas tablas se puede observar que la norma IEEE Std C62.82.1 no diferencia el aislamiento interno con el externo, es decir, considera el mismo nivel de aislamiento para ambos casos; mientras que la norma IEC 60071-2 determina el nivel de aislamiento externo e interno dando mayor seguridad al aislamiento interno, tomando en cuenta sus características de no-regenerabilidad y consiguientemente costos.

3.2.1.1 Análisis comparativo de los resultados para un sistema de 230 kV

Se realiza el análisis de resultados en base a los valores de aislamiento normalizados para los voltajes representativos del sistema. Para el efecto se toman los resultados obtenidos en el producto 2³ del Proyecto de Integración Curricular bajo el cual se desarrolla el presente TIC.

Para voltajes a frecuencia industrial:

Mediante la aplicación de la norma IEEE Std C62.82.1, el valor del nivel de aislamiento normalizado obtenido es de 360 kV y con la norma IEC 60071-2 se obtuvo el valor de 395 kV considerando dicho valor tanto para aislamiento interno como externo.

Al analizar estos resultados se puede observar que el aislamiento normalizado obtenido bajo la norma IEC 60071-2 es mayor que el valor normalizado de la norma IEEE, ya que la norma IEC considera ciertos factores de ajuste y coordinación que no son considerados en la norma IEEE, lo que vuelve los resultados más robustos, y recomendable para aquellos sistemas donde no se busca minimizar el riesgo de falla de aislamiento.

Para voltajes a impulso tipo rayo:

Mediante la aplicación de la norma IEEE Std C62.82.1, el valor del nivel de aislamiento normalizado es de 1050 kV y con la aplicación de la norma IEC 60071-2 también obtuvo el valor de 1050 kV para aislamiento externo y 950 kV para el aislamiento interno, los valores obtenidos mediante la aplicación de ambas normas son similares, dado que en los dos

³ El producto 2 fue elaborado por otra estudiante, y consistió en aplicar la norma IEEE Std C62.82.1 para la coordinación del aislamiento de los mismos ejemplos teóricos aplicados en este trabajo con fines comparativos.

casos se considera el factor de seguridad del 15% para el cálculo del voltaje soportado a impulso tipo rayo.

Tabla 3.4. Niveles de aislamiento normalizados para un sistema de 245 kV según la norma IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2.

Valores de voltajes normalizados			
	Aislamiento Interno y externo -Procedimiento de la norma IEEE Std C62.82.1 [kV]	Aislamiento externo - Procedimiento de la norma IEC 60071-2 [kV]	Aislamiento interno - Procedimiento de la norma IEC 60071-2 [kV]
Máximo voltaje del sistema	242	245	245
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	360	395	395
Voltaje soportado a impulso tipo rayo	1050	950 (fase-tierra) 1050 (fase-fase)	950

3.2.1.2 Análisis comparativo de los resultados para un sistema de 24 kV

Se realiza el análisis de resultados en base a los valores de aislamiento normalizados para los voltajes representativos del sistema. Para el efecto se toman los resultados obtenidos en el producto 2⁴ del Proyecto de Integración Curricular bajo el cual se desarrolla el presente TIC.

Para voltajes a frecuencia industrial:

Mediante la aplicación de la norma IEEE Std C62.82.1, el valor de voltaje normalizado es de 50 kV y con la aplicación de la norma IEC 60071-2 también se obtiene un voltaje normalizado de 50 kV considerando dicho valor tanto para aislamiento interno como externo.

⁴ El producto 2 fue elaborado por otra estudiante, y consistió en aplicar la norma IEEE Std C62.82.1 para la coordinación del aislamiento de los mismos ejemplos teóricos aplicados en este trabajo con fines comparativos.

Para voltajes a impulso tipo rayo:

Mediante la aplicación de la norma IEEE Std C62.82.1, el valor de voltaje normalizado es de 125 kV y con la aplicación de la norma IEC 60071-2 también se obtiene un voltaje normalizado de 125 kV, considerando dicho valor tanto para aislamiento interno como externo.

Como se puede observar, los resultados obtenidos mediante la aplicación de la norma IEC e IEEE son iguales para este caso de estudio, pero se debe considerar que la norma IEEE no diferencia entre el aislamiento interno y externo dado que define el mismo nivel de aislamiento para ambos casos, mientras que la norma IEC si los diferencia y realiza cálculos diferentes en ambos casos. En el caso de los voltajes a frecuencia industrial la diferencia radica en que la norma IEC aplica el factor de seguridad del 15% para aislamiento interno y del 5 % para el aislamiento externo, mientras que la norma IEEE no considera dicho factor y para el caso de los voltajes a impulso tipo rayo ambas normas aplican el factor de seguridad del 15 % con la diferencia que la norma IEC aplica también el factor de seguridad del 15 % para el aislamiento interno.

Tabla 3.5. Niveles de aislamiento normalizados para un sistema de 24 kV según la norma IEEE Std C62.82.1 e IEC 60071-2.

Valores de voltajes normalizados			
	Aislamiento -Procedimiento de la norma IEEE Std C62.82.1 [kV]	Aislamiento externo - Procedimiento de la norma IEC 60071- 2 [kV]	Aislamiento interno - Procedimiento de la norma IEC 60071- 2 [kV]
Máximo voltaje del sistema	26.2	24	24
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	50	50	50
Voltaje soportado a impulso tipo rayo	125	125	125

3.3 CONCLUSIONES

Del análisis realizado en este trabajo se determina que normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1 han desarrollado procedimientos propios para la coordinación de aislamiento, que para el caso de sistemas tipo I llevan a la determinación de los voltajes normalizados a frecuencia industrial y a impulso tipo rayo. Para el efecto ambas normas han sido

estructuradas para incluir en la primera parte una terminología básica propia (que en muchos casos realmente son sinónimos), en la segunda parte una guía con las reglas o pasos para la coordinación, y en la tercera ejemplos de aplicación para orientar a los lectores en su aplicación.

La diferencia principal entre tales procesos, son las etapas de análisis, que para el caso de la norma IEEE, involucra la caracterización de los medios de protección en la primera etapa, es decir se ubican los elementos limitadores de sobrevoltajes para determinar la amplitud y duración de las sobretensiones que afectarán a la subestación. En cambio, en el caso de la norma IEC, el efecto de los descargadores se analiza para la selección del voltaje representativo de frente lento, por medio de la comparación de los valores obtenidos de (u_{et} y u_{pt}) y el valor del descargador (u_{ps}) escogiendo el mínimo valor entre estos.

Otra de las diferencias entre la norma IEC e IEEE es el rango de niveles del aislamiento normalizados para sistemas tipo I, la norma IEC 60071-1 considera un rango desde 1 kV hasta 245 kV, mientras que la norma IEEE Std C.62.82.1 desde los 15 kV hasta 242 kV, dado que la norma IEC abarca un rango mayor de voltajes es recomendable utilizarla en sistemas menores a 15 kV, de tal manera que se evite sobredimensionar el nivel de aislamiento en los equipos.

En lo que respecta a las similitudes entre las normas IEC 60071-2 e IEEE Std C62.82.1, se puede mencionar el hecho de que las dos normas comparten ciertos parámetros que afectan el proceso de coordinación de aislamiento como lo son, los ajustes necesarios para el aislamiento con base al grado de contaminación y la diferencia entre las condiciones atmosféricas, los cuales, a pesar de ser obtenidos de diferente manera y que su nomenclatura sea diferente permiten ajustes adecuados del aislamiento.

Los voltajes soportados normalizados son seleccionados mediante rangos de voltaje de la tabla del anexo III, pero en ciertos casos los valores de voltaje normalizados sobrepasan en rango establecido para sistemas tipo I, por lo que ambas normas recomiendan el uso de elementos limitadores de sobrevoltajes; como por ejemplo la instalación de pararrayos evitando de esta manera sobredimensionar el aislamiento lo que a su vez puede reducir costos en la instalación.

La metodología para la coordinación de aislamiento mediante la norma IEEE Std C.62.82.1 puede resultar confusa y difícil de aplicar debido a que no solo involucra solo una norma para la coordinación de aislamiento y su metodología no es muy clara, mientras que la norma IEC 60071-2 cuenta con una sola norma con un orden metodológico más fácil para el lector.

La norma IEC 60071-2 considera factores de seguridad del 5% para aislamiento externo y 15% para el interno los cuales son aplicados a todos los tipos de sobrevoltajes que se pueden presentar en el sistema, mientras que la norma IEEE recomienda el 15 % tan solo para los sobrevoltajes a impulso tipo rayo. Lo que convierte a la norma IEC en una norma más segura y conservadora por lo que es recomendable aplicarla en ciertos casos en los que las condiciones atmosféricas del lugar de implantación del sistema puedan afectar el desempeño del aislamiento.

Dentro de este contexto, se llega a la conclusión que la norma IEC 60071-2 al ser una norma más conservadora los resultados obtenidos de la aplicación de esta son más robustos que los obtenidos mediante la aplicación de la norma IEEE Std C.62.82.1, lo que representa mayor confiabilidad en el sistema ante cualquier evento que se pueda presentar.

La norma IEC está orientada principalmente a líneas de transmisión debido a que no considera el efecto de los voltajes inducidos, además que al ser una norma más consistente resulta más adecuada para estos sistemas, mientras que la norma IEEE es más recomendable para sistemas de distribución.

3.4 RECOMENDACIONES

Para instalaciones que han sido previamente diseñadas bajo la norma IEC 60071-2, y se analicen nuevas expansiones, se recomienda utilizar la norma IEC 60071-2 con el fin de evitar errores al momento de seleccionar el valor óptimo para el nivel de aislamiento, ya que los equipos existentes ya han sido diseñados por el fabricante con dicha norma.

Si bien el alcance de este trabajo no estuvo orientado directamente a la coordinación de aislamiento, para este tipo de estudios, se recomienda simular la red eléctrica y modelar el sistema para cada caso de sobrevoltaje que se busque analizar, de tal manera que la coordinación de aislamiento sea en base a resultados lo más cercanos a la realidad y no a aproximaciones teóricas. De igual forma para sistemas tipo II el análisis estadístico es fundamental para la coordinación del aislamiento de este tipo de sistemas.

Se recomienda la aplicación de la norma IEC 60071-2 para la coordinación de aislamiento en sistemas que vayan a implantarse en el Ecuador, dado que es una norma comúnmente utilizada en el país debido a su orden metodológico y su confiabilidad.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Standard IEC 60071-1, “Insulation Coordination-Part 1: Definitions, principles, and rules. Ginebra: International Electrotechnical Commission”, 1993.
- [2] IEC 60071-2:1996, “Insulation co-ordination –Part 2: Application guide,”1996.
- [3] J A. Martínez. “Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión”, Madrid: McGraw-Hill, 2013.
- [4] B. Escobar y L. Ruales, “Coordinación de aislamiento en forma determinística, ante descargas atmosféricas en subestaciones aisladas en SF6. Aplicación: patio de 230 kV de la subestación Sopladora”, en Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE), 2016.
- [5] S.R. Paredes, “Simulación de transitorios electromagnéticos de la línea Cuenca-Macas con la aplicación del simulador ATP para la empresa eléctrica regional centro Sur C.A.,” Trabajo de grado., UCUENCA, 2011.
- [6] P.D. Mamani, “ Coordinación de aislamiento y análisis de sobretensiones atmosféricas para líneas aéreas de media tensión 22.9kV,” Trabajo de grado. Facultad de ingeniería mecánica eléctrica, UNAP, 2018.
- [7] L.M. Villalba Noriega, “Comparación entre las normas IEEE e IEC sobre coordinación de aislamiento (en sistemas de distribución hasta 69 kV), Trabajo de grado. Fac. Ingeniería Eléctrica y Electrónica, EPN,2016.
- [8] D.U. Pozo, “ Aplicación de sistemas expertos a la coordinación de aislamiento para el diseño de subestaciones eléctricas de alto voltaje,” Trabajo de grado. Fac. Ingeniería Eléctrica y Electrónica, EPN,2018.
- [9] IEEE Std C62.82.1, “IEEE Standard for Insulation Coordination-Definitions, Principles, and Rules,” 2016.

5 ANEXOS

ANEXO I. Resumen del proceso de coordinación de aislamiento en sistemas tipo I.

Etapa 1: Determinación de sobrevoltajes representativos (Urp) (seccion)	Etapa 2: Determinación de los voltajes soportados de coordinacion (Ucw)	Etapa 3: Determinación de los voltajes soportados especificados (Urw)	Etapa 4: Selección del voltaje tolerable normalizado
<p>Cálculo de sobrevoltajes a frecuencia industrial.</p> <p>Cálculo de sobrevoltajes temporales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sobrevoltajes por fallas a tierra <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cálculo del factor K (factor de falla a tierra) • Sobrevoltajes por pérdida de carga <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase-tierra ▪ Fase-fase <p>Finalmente se escoge el valor máximo entre los voltajes obtenidos para fase-tierra y fase-fase.</p> <p>Cálculo de sobrevoltajes de frente lento: Sobrevoltajes que afectan al equipo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra <ul style="list-style-type: none"> ○ Cálculo del voltaje U_{et} (método fase cresta) • Fase-fase <ul style="list-style-type: none"> ○ Cálculo del voltaje U_{pt} (método fase cresta) <p>El cálculo se hace en base al nivel de proyección a impulso tipo maniobra de tal manera que el valor de Urp para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra 	<p>Cálculo de sobrevoltajes temporales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra <ul style="list-style-type: none"> ○ Factor de coordinación K_c es igual a 1 • Fase-fase <ul style="list-style-type: none"> ○ Factor de coordinación K_c es igual a 1 <p>Cálculo de sobrevoltajes de frente lento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra <ul style="list-style-type: none"> ○ Cálculo de factor de coordinación determinista K_c • Fase-fase <ul style="list-style-type: none"> ○ Cálculo de factor de coordinación determinista K_{cd} <p>Cálculo de sobrevoltajes de frente rápido:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para aislamiento interno • Para aislamiento Externo <p>Para ambos casos se realiza el cálculo de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ U_{pt}: el nivel de protección de la onda tipo rayo del pararrayos (kV); ✓ A: un factor de comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada a la subestación ✓ n: el número mínimo de líneas conectadas a la subestación. ✓ L: la distancia de separación. ✓ L_{sp}: la longitud del vano (m); 	<p>Cálculo de sobrevoltajes temporales: <i>Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Previo al cálculo de los voltajes fase-tierra y fase-fase, se calcula lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Factor de seguridad (K_s) ○ Factor de corrección atmosférica (K_a) ✓ Cálculo de m y H <p><i>Para aislamiento interno</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Previo al cálculo de los voltajes fase-tierra y fase-fase, se debe tomar en cuenta lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Factor de seguridad (K_s) <p>Cálculo de sobrevoltajes de frente lento: <i>Equipo entrada de la línea Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Se procede hacer los mismos cálculos previos que se consideran para los sobrevoltajes temporales. <i>Para otros equipos</i></p>	<p>Conversión hacia el voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial (SDW) Se aplica fórmulas de conversión del anexo V.</p> <p><i>Equipo entrada de la línea Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p><i>Para otros equipos Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p><i>Para aislamiento interno</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Conversión hacia el voltaje soportado a impulso tipo rayo (LIW) Se aplica fórmulas de conversión del anexo V.</p> <p><i>Equipo entrada de la línea Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase

<ul style="list-style-type: none"> ○ Cálculo de sabiendo U_{rp} que $U_{rp}=U_{ps}$ • Fase-fase <ul style="list-style-type: none"> ○ $U_{rp}=2U_{ps}$ <p>En el caso de que estos valores de protección sean inferiores a las correspondientes solicitaciones máximas de sobrevoltaje de frente lento (valores de u_{et} y u_{pt}) se escoge el mínimo valor entre estos.</p> <p>Cálculo de sobrevoltajes de frente rápido: Para los sistemas tipo I, se considera solo los sobrevoltajes debidos al rayo, lo cual conduce a la etapa 2 siguiente.</p>	<p>✓ L_a: es la porción de línea aérea cuya tasa de falla es igual a la tasa de fallas establecida aceptable.</p>	<p><i>Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Se procede hacer los mismos cálculos previos que se consideran para los sobrevoltajes temporales.</p> <p><i>Para aislamiento interno</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Se considera el mismo factor que en los sobrevoltajes temporales.</p> <p>Cálculo de sobrevoltajes de frente rápido:</p> <p><i>Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Se procede hacer los mismos cálculos previos que se consideran para los sobrevoltajes temporales.</p> <p><i>Para aislamiento interno</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Se considera el mismo factor que en los sobrevoltajes temporales.</p>	<p>Para otros equipos</p> <p><i>Para aislamiento externo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p><i>Para aislamiento interno</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase-tierra • Fase-fase <p>Finalmente se realiza la selección de los voltajes soportados en base al anexo II.</p>
---	--	--	--

ANEXO II. Resumen de la selección de los voltajes requeridos

Para la selección de los voltajes requeridos se requiere seleccionar el valor máximo entre el siguiente grupo de colores:

Color azul: Corresponde a los valores de voltajes soportados requeridos (U_{rw}) de tipo temporal para aislamiento externo calculados en la etapa 3.

Color verde: Corresponde a los valores de voltajes soportados requeridos (U_{rw}) de tipo temporal para aislamiento interno calculados en la etapa 3.

Color rosado: Corresponde a los valores de voltajes soportados requeridos (U_{rw}) de tipo frente rápido para aislamiento externo calculados en la etapa 3.

Color café: Corresponde a los valores de voltajes soportados requeridos (U_{rw}) de tipo frente rápido para aislamiento interno calculados en la etapa 3.

Color naranja: Corresponde al máximo valor de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial (SDW) para aislamiento externo (fase-tierra) calculado en la etapa 4.

Color morado: Corresponde al máximo valor de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial (SDW) para aislamiento externo (fase-fase) calculado en la etapa 4.

Color rojo: Corresponde al máximo valor de soportabilidad a impulso tipo rayo (LIW) para aislamiento externo (fase-fase) calculado en la etapa 4.

Color celeste: Corresponde a los valores valor de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial (SDW) y a impulso tipo rayo (LIW) para aislamiento interno calculado en la etapa 4.

Para el caso de la selección del voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial, tanto para aislamiento interno como externo se escoge el valor máximo entre el voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial calculado en la etapa 3 y los voltajes convertidos de Impulsos tipo maniobra a voltajes soportados asignados a frecuencia industrial calculados en la etapa 4.

Para el caso de la selección del voltaje soportado de corta duración a impulso tipo rayo tanto para aislamiento interno como externo se escoge el valor máximo entre los valores de voltajes soportados requeridos de tipo frente rápido calculados en la etapa 3 y los voltajes convertidos de Impulsos tipo maniobra convertidos a voltajes soportados asignados tipo rayo calculados en la etapa 4.

Valores de U_{rw} kV		Aislamiento externo		Aislamiento interno	
		$U_{rw}(s)$ No convertido	$U_{rw}(c)$ Convertido	$U_{rw}(s)$ No convertido	$U_{rw}(c)$ Convertido
Voltaje de soportabilidad de corta duración a frecuencia industrial	Fase-tierra				
	Fase-fase				
Impulsos tipo maniobra convertidos en tensiones soportadas asignadas a frecuencia industrial	Fase-tierra		Máximo		
	Fase-fase		Máximo		
Impulsos tipo maniobra convertidos en tensiones soportadas asignadas tipo rayo	Fase-tierra		Máximo		
	Fase-fase		Máximo		
Impulso tipo rayo					

Figura 5.1. Valores de soportabilidad requeridos.

Valores de U_{rw} kV		Aislamiento externo		Aislamiento interno	
		$U_{rw}(s)$ No convertido	$U_{rw}(c)$ Convertido	$U_{rw}(s)$ No convertido	$U_{rw}(c)$ Convertido
Voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial	Fase-tierra	VALOR MÁXIMO		VALOR MÁXIMO	
	Fase-fase	VALOR MÁXIMO		VALOR MÁXIMO	
Impulsos tipo maniobra convertidos en tensiones soportadas asignadas a frecuencia industrial	Fase-tierra		Máximo		
	Fase-fase		Máximo		
Impulsos tipo maniobra convertidos en tensiones soportadas asignadas tipo rayo	Fase-tierra	VALOR MÁXIMO	Máximo	VALOR MÁXIMO	
	Fase-fase		Máximo		
Impulso tipo rayo					

Figura 5.2. Resumen de los valores de soportabilidad requeridos.

ANEXO III. Niveles de aislamiento normalizados para sistemas tipo I ($1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$). Elaboración propia en base a [1].

Voltaje más elevado del material U_m kV (Valor eficaz)	Voltaje soportado asignado normalizado a frecuencia industrial de corta duración kV (Valor eficaz)	Voltaje soportado asignado normalizado a impulso tipo rayo kV (Valor cresta)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
17,5 ^a	38	95
		75
24	50	95
		125
36	70	145
		170
52 ^a	95	250
72,5	140	325
100 ^b	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170 ^a	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1.050

NOTA Si los valores entre paréntesis se consideran insuficientes para demostrar el cumplimiento de los voltajes soportados requeridos entre fases, se necesitan ensayos adicionales de voltajes soportados entre fases.

^a Estos U_m No son valores preferenciales en la norma IEC 60038 y por lo tanto no se dan estas combinaciones normalizadas muy frecuentemente en las normas de producto.

^b Estos valores de U_m no se mencionan en la norma IEC 60038, pero se han incluido en la gama I en ciertas normas de producto.

ANEXO IV. Tipos y formas de sobrevoltajes, formas de voltaje normalizadas y ensayos de voltaje soportado normalizado [3].

Tipo	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_r \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizadas					a
	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Ensayo de tensión soportada normalizada	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	a

^a A especificar por los comités de producto correspondientes.

ANEXO V. Factores de conversión de ensayo para sistemas tipo I para convertir los voltajes soportados tipo maniobra especificadas en voltajes a impulso tipo rayo y a frecuencia industrial. Elaboración propia en base [2].

Aislamiento	Voltaje soportado a frecuencia industrial de corta duración*	Voltaje soportado a impulso tipo rayo
Aislamiento externo -distancias en el aire y aisladores limpios, en seco: - Fase-tierra - Fase-fase - aisladores limpios, bajo lluvia	$U_{rw} \cdot (0.6 + U_{rw}/8500)$ $U_{rw} \cdot (0.6 + U_{rw}/12700)$ 0.6	$U_{rw} \cdot (0.6 + U_{rw}/6000)$ $U_{rw} \cdot (0.6 + U_{rw}/9000)$ 1.3
Aislamiento interno - GIS - Aislamiento sumergido en un liquido - Aislamiento solido	$U_{rw} \cdot 0.7$ $U_{rw} \cdot 0.5$ $U_{rw} \cdot 0.5$	$U_{rw} \cdot 1.25$ $U_{rw} \cdot 1.10$ $U_{rw} \cdot 1.00$
NOTA- U_{rw} es el voltaje soportado a impulso tipo maniobra especificada en kV. *Los factores de conversión de ensayo incluyen un factor $1/\sqrt{2}$ para convertir los valores de creta en valores eficaces.		

ANEXO VI. Correlación de los voltajes soportados normalizados a impulso tipo rayo y las distancias mínimas en el aire.

Tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada kV	Distancia en el aire mínima mm	
	Punta-estructura	Conductor-estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1 100	
650	1 300	
750	1 500	
850	1 700	1 600
950	1 900	1 700
1 050	2 100	1 900
1 175	2 350	2 200
1 300	2 600	2 400
1 425	2 850	2 600
1 550	3 100	2 900
1 675	3 350	3 100
1 800	3 600	3 300
1 950	3 900	3 600
2 100	4 200	3 900

NOTA – El impulso tipo rayo normalizado es aplicable a los aislamientos fase-fase y fase-tierra.
 Para los aislamientos fase-tierra, la distancia en el aire mínima para las configuraciones conductor-estructura y punta-estructura es aplicable.
 Para los aislamientos fase-fase, la distancia en el aire mínima para la configuración punta-estructura es aplicable.