



APLICACIONES INDUSTRIALES

Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de media tensión

Insulation coordination in medium voltage electrical networks

Mariela Del Cisne Carrión González ¹; Franklin Gustavo Jiménez Peralta ¹; Rodolfo Pabel Merino Vivanco ¹; Jorge Enrique Carrión González ^{1,*}; Andy Fabricio Vega León ²

¹Universidad Nacional de Loja-Ecuador. Ecuador.

²Centro de investigación, innovación, desarrollo de prototipos tecnológicos y pruebas electroenergéticas “I2 TEC”.

*Autor de correspondencia: jorge.carrion.g@unl.edu.ec

Recibido: 8 de septiembre del 2021 Aprobado: 15 de febrero del 2022

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

RESUMEN/ ABSTRACT

El presente trabajo expone el desarrollo metodológico para coordinar el aislamiento de redes eléctricas de media tensión; el estudio se efectuó aplicando procedimientos de cálculo, en donde se evalúan los diferentes factores que intervienen para definir y dimensionar el nivel de aislamiento adecuado para los equipos que conforman una red eléctrica primaria. Para efectuar la coordinación de aislamiento es necesario conocer y determinar los parámetros de operación del sistema y determinar sus componentes, para luego definir las características eléctricas que debe poseer el descargador (pararrayo) y en base a lo establecido en las normas CEI 60071-1 y CEI 60071-2 determinar los tipos y niveles de sobretensiones que podrían presentarse en la red, considerando los diferentes factores de coordinación, seguridad y corrección por altura, para definir los defectos que se puedan presentar en el aislamiento debido a las condiciones reales de operación y así seleccionar un nivel de aislamiento adecuado.

Palabras clave: Coordinación de aislamiento, redes eléctricas de media tensión, pararrayos.

This paper presents the methodological development to coordinate the insulation of medium-voltage electrical networks; the study was carried out applying calculation procedures, in which the different factors involved in defining and dimensioning the appropriate insulation level for the equipment making up a primary electrical network are evaluated. In order to carry out insulation coordination, it is necessary to know and determine the operating parameters of the system under analysis and to determine its components, in order to then define the electrical characteristics that the lightning conductor (lightning conductor) must have and, based on the provisions of IEC 60071-1 and IEC 60071-2 standards, to determine the types and levels of overvoltages that could occur in the network, considering the different coordination factors, safety and height correction, in order to cover the defects that may occur in the insulation due to the real operating conditions and thus select an adequate insulation level.

Keywords: Isolation coordination, primary network, lightning rod.

INTRODUCCIÓN

Los equipos e instalaciones eléctricas son sometidos a sobrevoltajes que pueden afectar su aislamiento y provocar una falla o una avería. La selección y ubicación adecuada de los distintos medios de protección sólo se podrá realizar de forma correcta si se conoce su comportamiento frente a los distintos sobrevoltajes, las redes eléctricas que componen los sistemas de distribución están expuestas a fenómenos que pueden causar daños parciales o totales del aislamiento de los equipos que conforman la misma, lo cual origina inconvenientes en las prestaciones del servicio eléctrico y a su vez ocasionan considerables pérdidas económicas. En [1, 2], se expone que prever el origen, características y complicaciones que conllevan consigo la aparición de estos fenómenos denominados sobretensiones son puntos fundamentales para establecer parámetros adecuados para la selección de los niveles de aislamiento de los elementos que formarán parte de una red eléctrica. La selección de estos niveles de aislamiento se la entiende por el concepto de “coordinación de aislamiento” el mismo que es uno de los principales fundamentos para el desarrollo de diseños y proyectos en lo que compete a los sistemas de distribución de media tensión.

Cómo citar este artículo:

Jorge Enrique Carrión González; *et al.* Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de media tensión.
2022, vol. 43, n. 1, enero/abril. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Existen diversas normas que exponen la coordinación de aislamiento, cada una de ellas maneja su propia filosofía de realización de los cálculos y aplicaciones, se enfocan en dimensionar adecuadamente los niveles de aislamiento de todo los dispositivos y equipos que conforman una red de media tensión, entre las principales normas existentes se pueden mencionar a la IEC 60071-1 y la IEEE Std 1313.1. En [1, 2], se establece la coordinación de aislamiento como: la selección de la soportabilidad o resistencia eléctrica de un equipo y su aplicación en relación con las tensiones que pueden aparecer en el sistema en el cual el equipo será utilizado, teniendo en cuenta las características de los dispositivos de protección disponibles. Esta norma se aplica a las redes de tensión alterna trifásica cuya tensión más elevada para el material es superior a 1 kV, se especifica el procedimiento para la elección de tensiones soportadas normalizadas para el aislamiento fase-tierra, el aislamiento entre fases y el aislamiento longitudinal del material e instalaciones de estas redes.

En [2], se define la coordinación de aislamiento como el proceso de implementar la fortaleza de aislamiento a los diferentes equipamientos eléctricos mediante una relación apropiada entre las sobretensiones esperadas y las características de los dispositivos protectores, las recomendaciones sugeridas son aplicables a los sistemas de corriente alterna de tres fases que estén sobre el 1 kV, se especifica el procedimiento para la selección de los sistemas de aislamiento adecuados para soportar las sobretensiones que puedan presentarse.

En [3-5], se define a la coordinación de aislamiento como: conjunto de disposiciones tomadas con el objeto de evitar daños a los aparatos eléctricos debido a las sobretensiones y para localizar las descargas de arco, en los puntos en los cuales no pueden causar daño. Se define que estos objetivos se logran estableciendo una adecuada correlación entre las condiciones que debe resistir el aislamiento de aparatos, las sobretensiones a que pueden estar sometidos en servicio y las características de los dispositivos de protección contra sobretensiones. En [1-5], se definen diferentes parámetros para la coordinación de aislamiento de redes eléctricas, de acuerdo a las especificaciones definidas, se puede apreciar que la coordinación del aislamiento tiene por objeto determinar las características de aislamiento necesarias y suficientes de los diversos componentes de las redes eléctricas de media tensión, para obtener una rigidez homogénea a las tensiones normales, así como a las sobretensiones de origen diverso la protección del aislamiento, la continuidad del servicio y la economía [6-11]. De manera que, la coordinación de aislamiento puede entenderse más específicamente como la determinación de un nivel de aislamiento, para un grado específico de confiabilidad a un costo aceptable, es decir con una tasa o razón de fallas razonable.

Las redes de distribución eléctrica desde sus inicios, han sido el mecanismo utilizado por las empresas distribuidoras para abastecer de energía, las mismas que debido a su constante crecimiento presentan un mayor consumo eléctrico lo que hace necesario realizar ajustes en los sistemas de distribución para disminuir el número de fallos, mejorando la calidad de servicio y con ello alcanzar una mayor confiabilidad del sistema de distribución.

Debido a que, en diversos sectores del Ecuador, aún se presentan fallas en las redes eléctricas producidas por las sobretensiones, se evidencia la falta de un plan estratégico y eficiente de aislamiento por parte de las empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica. Entre las diferentes causas de fallos que se pueden llegar a presentar en los sistemas eléctricos, se encuentran los fallos debidos a fenómenos de sobretensiones, los mismos que generan la destrucción de los diferentes equipos y materiales que conforman una red eléctrica de distribución. La coordinación de aislamiento es importante, esta permite realizar la selección de niveles de aislamiento adecuados, que estén en función de los niveles de sobretensiones y sus causas y efectos, para con ello determinar el nivel de protección adecuado.

El presente trabajo analiza de forma conjunta las clases de sobretensiones mediante la aplicación de criterios técnicos para estimar y deducir las magnitudes que estas podrían llegar a alcanzar y con ello establecer una correcta coordinación de aislamiento para su mitigación.

Se utilizaron los criterios establecidos en la norma CEI 60 071, específicamente los apartados 1 y 2, identificando que los procedimientos para establecer una coordinación de aislamiento se basan en la determinación de las resistencias dieléctricas de los dispositivos que componen un circuito con relación a los esfuerzos de tensión que pueden presentarse, considerando las características técnicas de los elementos de protección.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Para establecer el procedimiento que se debe efectuar para la coordinación de aislamiento se selecciona el circuito de distribución Villonaco de la ciudad de Loja-Ecuador, se describen las características que presenta el circuito de media tensión, se comprueban si los niveles de aislamiento son los adecuados, para evaluar y comparar los valores de aislamiento obtenidos y los que posee la red.

DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO VILLONACO

El circuito de media tensión #0116 - Villonaco existente en el cantón Loja, presenta un nivel de tensión nominal para distribución de 13,8 kV con un nivel de aislamiento de 95 kV (ver tabla 1, cuya longitud total es de 43,68 km (longitud ramal monofásico 21,40 km, longitud ramal bifásico 4,77 km y longitud ramal trifásico 17,50 km) [12].

Coordinación de aislamiento del alimentador villonaco.

Para la coordinación del aislamiento de redes distribución se efectúa el procedimiento de cálculo que se expone a continuación, de acuerdo a los criterios de diseño recomendados en la literatura técnica [12-15]:

Paso 1: Descripción de los parámetros de operación del sistema.

Se describen los parámetros generales de funcionamiento del sistema:

- Tensión nominal
- Frecuencia nominal
- Tensión asignada al equipo
- Nivel de contaminación ambiental
- Sistemas de puesta a tierra
- Altura sobre el nivel del mar
- Temperatura promedio

Paso 2: Identificación de los elementos que conforman una red de distribución de media tensión.

La identificación de los elementos que van a formar parte del sistema de distribución es esencial, con el fin de enfocarse únicamente a estos y una vez definidos los valores de tensiones, realizar la selección de estos dispositivos con mayor precisión.

Paso 3: Cálculo y dimensionamiento de las características eléctricas del pararrayo.

El proceso para el dimensionamiento del pararrayo considera:

Determinar la tensión de operación continua (U_c) en función de la tensión máxima fase-tierra del sistema (U_{mx}), aplicando la ecuación (1):

$$U_c = \frac{U_{mx}}{\sqrt{3}}(1,05) \quad (1)$$

Determinar la tensión asignada (U_r) a través de la ecuación (2):

$$U_r = 1,25U_c \quad (2)$$

Establecer un valor de intensidad nominal de descarga (I_d) en función de los valores de tensión previamente definidos (tabla 1) [13]:

Tabla 1: Corriente nominal de descarga y tensiones residuales para pararrayos						
Corriente nominal de descarga en función de la tensión asignada del pararrayos.						
Corriente nominal de descarga	Tensión asignada					
	U_r (kV)					
	< 3	3 - 29	30 -132	144 - 342	360 - 756	
1,5 kA	x					
2,5 kA	x	x	x			
5 kA	x	x	x			
10 kA		x	x	x		
20 kA			x	x		
Tensiones residuales para pararrayos de 20 kA y 10 kA en p.u. de la tensión asignada.						
20 kA $U_{residual} (kV) / U_r$	Frente escarpado	-	-	2,6 – 3,1	2,6 – 3,1	2,6 – 3,1
	Tipo rayo	-	-	2,3 – 2,8	2,3 – 2,8	2,3 – 2,8
	Tipo maniobra	-	-	2,0 – 2,3	2,0 – 2,3	2,0 – 2,3
10 kA $U_{residual} (kV) / U_r$	Frente escarpado	-	2,6 – 4,0	2,6 – 3,7	2,6 – 3,7	2,6 – 3,1
	Tipo rayo	-	2,3 – 3,6	2,3 – 3,3	2,3 – 3,3	2,3 – 2,8
	Tipo maniobra	-	2,0 – 2,9	2,0 – 2,6	2,0 – 2,6	2,0 – 2,3
Nota 1: las corrientes de frente escarpado, tipo rayo y tipo maniobra para las que resultan los presentes valores están definidos según la norma CEI 60099-4.						
Nota 2: El rango de tensiones residuales máximas mostradas son las normalmente disponibles.						

Determinar los niveles de protección del pararrayos (U_{pl} y U_{ps}) (tabla 2) [3]:

Donde:

U_{pl} es el nivel de protección del pararrayos a impulso tipo rayo en kV

U_{ps} es el nivel de protección del pararrayos a impulsos tipo maniobra en kV

Paso 4: Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp}).

Sobretensiones temporales:

Se caracterizan por sus amplitudes, su forma de tensión y su duración. Para propósitos de coordinación de aislamiento, se considera que la sobretensión temporal representativa tiene la forma de onda de la tensión de corta duración normalizada a frecuencia industrial (1 minuto) [13], aplicando las ecuaciones (3) y (4).

$$U_{rp} = k \frac{U_s}{\sqrt{3}} [Fase - Tierra] \quad (3)$$

$$U_{rp} = k U_s [Fase - Fase] \quad (4)$$

Donde k es un factor de defecto a tierra y U_s es tensión base [2].

Para los valores representativos del factor de defecto a tierra se tiene (k); neutro sólidamente puesto a tierra 1,4, neutro no sólidamente puesto a tierra 1,7 y neutro aislado 1,9.

Sobretensiones de frente lento:

Esta sobretensión se caracteriza por tener una forma de onda estandarizada de impulso tipo maniobra y su máxima amplitud puede ser un valor máximo asumido o puede ser definido por una función de distribución de frecuencia de ocurrencia de amplitudes de sobretensiones de frente lento [13].

El valor máximo que se elige para definir la sobretensión representativa de frente lenta fase – tierra corresponde al valor del nivel de protección del pararrayos ante impulsos tipo maniobra $U_{rp} = U_{ps}$. En el caso de sobretensiones fase-fase de este tipo, es el doble del nivel de protección por $U_{rp} = 2U_{ps}$ [5].

Sobretensiones de frente rápido:

Las sobretensiones de maniobra de frente rápido, ocurren cuando la aparamenta está conectada o desconectada de la red por medio de conexiones cortas, principalmente dentro de subestaciones.

De acuerdo con la norma CEI 60071-2, para propósitos de coordinación, la sobretensión representativa por maniobras y defectos pueden considerarse que corresponde a impulso tipo rayo normalizado (1,2/50 μ s), puesto que los valores que puede llegar a alcanzar son menores a los causados por un rayo, es por ello que su importancia es restringida a casos especiales [14].

La determinación de la sobretensión por impulsos tipo rayo se la realiza en base a la protección a emplearse contra este tipo de fenómenos, donde por lo general se utilizan pararrayos. Las características de protección de un pararrayos, son válidas únicamente en su ubicación.

Paso 5: Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}).

Cuando el aislamiento se caracteriza por su tensión soportada convencional prevista, el valor de soportabilidad se selecciona igual a la tensión soportada de coordinación, obtenida multiplicando la sobretensión representativa por un factor de coordinación K_c .

Sobretensiones temporales:

La tensión soportada de coordinación para la tensión permanente a frecuencia industrial es igual a la tensión más elevada fase-fase de la red y esta tensión, dividida por $\sqrt{3}$ para aislamientos fase-tierra con una duración igual a la vida en servicio y la tensión soportada de coordinación de corta duración, es igual a la sobretensión temporal representativa. Es decir que el factor de coordinación para estos casos será $K_c = 1$. Entonces: Vea ecuación (5).

$$U_{cw} = K_c U_{rp} \quad (5)$$

Donde:

K_c es el factor de coordinación y U_{rp} es la sobretensión representativa permanente a frecuencia industrial (para fase-fase y fase-tierra) y U_{cw} es la tensión soportada de coordinación [14].

Sobretensiones de frente lento:

Para equipos protegidos por pararrayos, la sobretensión máxima prevista es igual al nivel de protección a impulso tipo maniobra U_{ps} del pararrayos.

Donde:

U_{ps} es el nivel de protección del pararrayos a impulsos tipo maniobra en kV

Sin embargo, en estos casos, puede tener lugar una asimetría severa de la distribución estadística de las sobretensiones. Esta asimetría es más significativa cuanto menor es el nivel de protección comparado con las amplitudes de las sobretensiones de frente lento previstas, de modo que pequeñas variaciones de la soportabilidad del aislamiento (o en el valor del nivel de protección del pararrayos) pueden tener un gran impacto en el riesgo de fallo [15].

Para cubrir este efecto, se propone evaluar el factor de coordinación determinista K_{cd} dependiendo de la relación entre el nivel de protección a impulsos tipo maniobra del pararrayos U_{ps} y el valor de una sobretensión estadística, de nomenclatura U_{e2} que tendría un rango de 2% (en valores p.u. de la tensión base), valor que se establece evaluando la figura 1, donde se presenta el rango de valores de sobretensiones que puede esperarse entre fase y tierra, sin limitación proveniente de pararrayos en función de los parámetros conocidos del sistema. Los datos de la figura 1, están basados en un número de resultados obtenidos sobre el terreno y en estudios, incluye los efectos de muchos de los factores determinantes de las sobretensiones [13].

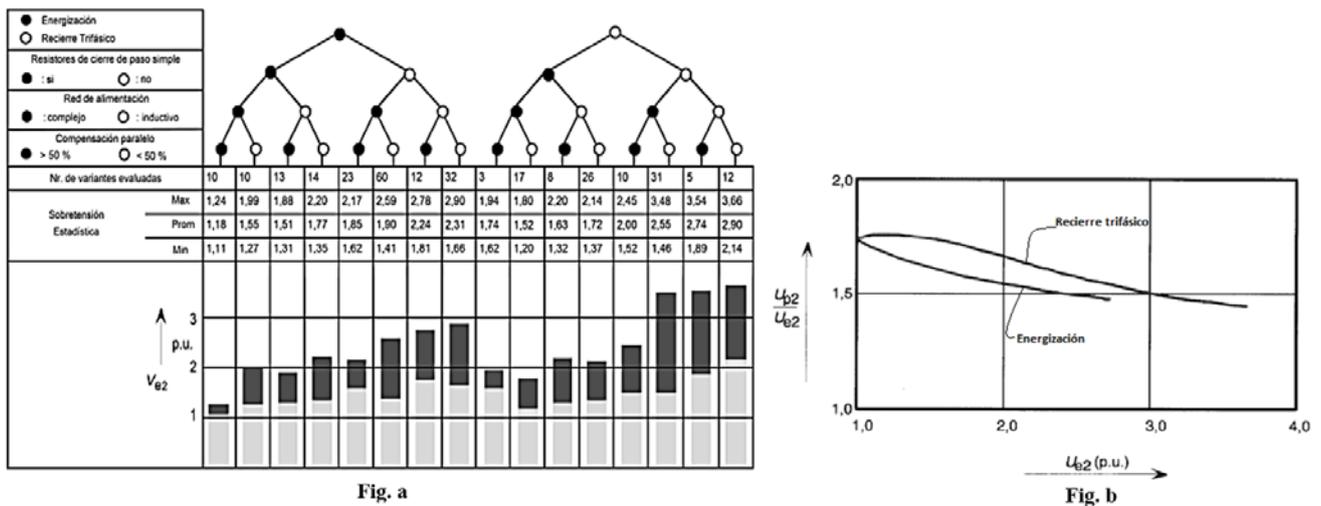


Fig. 1. a) Rango de sobretensiones de frente lento 2% en el extremo de recepción debido a la energización y re-cierre trifásico, b) Relación entre los valores 2% de las sobretensiones de frente lento entre fases y fase – tierra.

Donde:

K_{cd} es el factor de coordinación determinista y U_{e2} es el valor de sobretensión fase-tierra con una probabilidad del 2% de ser excedida en kV.

El valor de sobretensión estadística entre fases U_{p2} puede ser determinado aproximadamente a partir de la sobretensión fase-tierra. La figura 1 (b), se muestra las relaciones posibles entre los valores de las sobretensiones estadísticas entre fases y fase-tierra. El límite superior de este rango se aplica a las rápidas sobretensiones de reenganche trifásicas, el límite inferior se aplica a sobretensiones de conexión trifásica [13].

Una vez deducidos los valores de U_{e2} y U_{p2} se procede a la estimación del factor determinista de coordinación K_{cd} de acuerdo a la figura 2 [4].

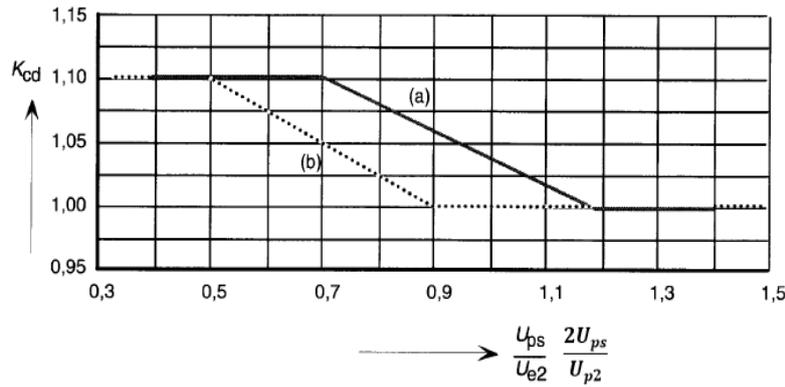


Fig. 2. Evaluación del factor de coordinación determinista K_{cd} .

De la gráfica: a es el factor de coordinación aislamiento fase – tierra y b es el factor de coordinación fase – fase, haciendo uso de la figura 2, es posible aplicar la ecuación (6) y (7).

$$U_{cw} = K_{cd} U_{ps} \quad (6)$$

$$U_{cw} = K_{cd} 2U_{ps} \quad (7)$$

Donde:

K_{cd} : Factor de coordinación determinista

U_{ps} : Nivel de protección del pararrayos a impulsos tipo maniobra

U_{p2} : Valor de sobretensión fase-fase con una probabilidad del 2% de ser excedida en kV

U_{cw} : Tensión soportada de coordinación en kV

Sobretensiones de frente rápido:

Para las sobretensiones de rayo de frente rápido, se aplica un factor de coordinación determinista $K_{cd} = 1$ a los valores máximos previstos de las sobretensiones. Este valor se debe a que para las sobretensiones de rayo, la sobretensión representativa ya incluye los efectos probabilísticos, la metodología simplificada expuesta en la norma IEC 60 071-2 permite calcular la tensión mínima de soportabilidad de los equipos mediante una ecuación similar a la utilizada para la determinación de la tensión representativa, pero con la diferencia de que esta basa su cálculo a partir de una tasa de fallo aceptable (R_a) definida para un equipo [13], según la ecuación (8).

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (8)$$

Donde:

U_{cw} : Tensiones soportadas de coordinación

U_{pl} : es el nivel de protección del pararrayos a impulsos tipo rayo

L_{sp} : Longitud del vano (m)

L_a : Porción de línea aérea cuya tasa de defecto es igual a la tasa de fallos establecida aceptable

n : Es el número mínimo de líneas conectadas al equipo de transformación ($n=1$ o $n=2$) y $L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ (distancias según el diagrama expuesto en la tabla 2)

A : es el factor de comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada al equipo de transformación (tabla 2).

Tabla 2: Factor A para diferentes tipos de líneas aéreas.

Tipo de línea	A(kV)	Diagrama de la conexión del pararrayos al objeto protegido.
Líneas de distribución (cebados entre fases) <ul style="list-style-type: none"> Con las crucetas puestas a tierra (cebado a tierra con una tensión pequeña) Líneas con apoyos de madera (cebado a tierra con una tensión alta) 	900 2700	
Líneas de transporte (cebados fase tierra) <ul style="list-style-type: none"> Un solo conductor Haz doble Haz cuádruple Has de seis u ocho conductores 	4500 7000 11000 17000	

En el diagrama expuesto en la tabla 2, a_1 es la longitud del conductor que conecta el pararrayos con la línea; a_2 es la longitud del conductor que conecta el pararrayos a tierra; a_3 es la longitud del conductor de fase entre el pararrayos y el equipo protegido; a_4 es la longitud de la parte activa del pararrayos; para L_a la tasa de defecto es igual a la tasa de fallos establecida aceptable según la ecuación (9) [16].

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \quad (9)$$

Donde:

R_a : Es la tasa de fallos establecida aceptable del equipo (La tasa de fallos aceptable para los equipos va desde el 0,001/año hasta el 0,004/año)

R_{km} : Es la tasa de defectos anuales de la línea aérea para un diseño que corresponda al primer kilómetro a partir del equipo de transformación (el 0,1/ 100 km al año hasta 20/100 km al año siendo el mayor valor para líneas de distribución).

Paso 6: Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw})

Para la determinación de las tensiones soportadas específicas se tiene en cuenta todos los factores que pueden reducir el aislamiento en servicio, de forma que se mantenga la tensión soportada de coordinación durante toda la vida del material en el lugar donde esté instalado [13, 17, 18, 19].

Para conseguirlo deben considerarse dos tipos principales de factores de corrección:

a) K_s que es el factor de seguridad, debe considerar las diferencias entre las condiciones reales en servicio del aislamiento y las de los ensayos normalizados de tensión soportada.

La norma CEI 60071-2 recomienda los siguientes factores de seguridad en función del tipo de aislamiento: para el aislamiento interno $K_s = 1,15$; para el aislamiento externo $K_s = 1,05$ [4].

b) Factor de corrección atmosférico, el cual contempla un factor K_a que se refiere a la altitud de la instalación.

La determinación del factor de corrección de altitud K_a se obtiene a partir de la ecuación (10), sin embargo, los valores tabulados en la norma CEI 60071-1, referentes al rango de valores de las tensiones soportadas estandarizadas se las ha definido considerando condiciones de operación en alturas de hasta los 1 000 m.s.n.m, por lo cual para alturas superiores a esta el factor K_a será establecido a partir de la ecuación (11) [13, 17, 18, 19].

$$K_a = e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)} \quad (10)$$

$$K_a = e^{m\left(\frac{H-1000}{8150}\right)} \quad (11)$$

Donde:

K_a : Factor de corrección por altura

H : es la altitud sobre el nivel del mar

m : es igual a 1,0 para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo rayo; m es igual a 1,0 para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración de las distancias en el aire y de aisladores limpios; para aisladores contaminados. Para los ensayos de larga duración y, si es necesario, para los de tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración de aisladores contaminados, m puede variar desde 0,5 para los aisladores normales hasta 0,8 para los antiniebla y m con base a la figura 3, para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo maniobra.

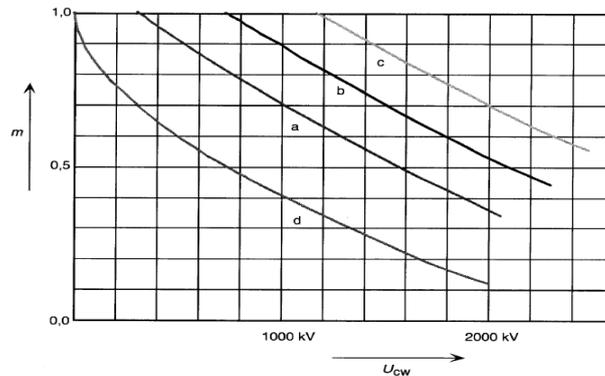


Fig. 3. Relación entre el exponente m y la tensión soportada de coordinación a impulsos tipo maniobra.

De la figura 5, a es aislamiento fase–tierra; b es aislamiento longitudinal; c es aislamiento entre fases y d es el intervalo en el aire punta–plano.

Los valores para las tensiones soportadas especificadas son establecidos mediante la aplicación de las ecuaciones (12) y (13) tanto para sobretensiones temporales, de frente lento y de frente rápido [14]:

Aislamiento externo:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \cdot K_a \quad (12)$$

Aislamiento interno:

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot K_s \quad (13)$$

Donde:

U_{cw} : Es la tensión soportada de coordinación para sobretensiones temporales

K_s : Factor de seguridad para aislamiento externo

K_a : Factor de corrección por altura

Paso 7: Selección de los niveles de aislamiento normalizados (U_w)

En la gama I (de 1 kV a 245 kV), lo más conveniente es que la tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial o la tensión soportada a impulsos tipo rayo normalizada cubran las tensiones soportadas especificadas a impulso tipo maniobra entre fase y tierra y entre fases [13, 17, 18].

En la tabla 3, se presentan los factores de conversión establecidos en la norma CEI 60071-2, para calcular la tensión soportada de frecuencia industrial equivalente, por sus siglas en inglés SDW (*Short Duration Power Frequency Withstand Voltage*) y la tensión soportada a impulso tipo rayo equivalente, por sus siglas en inglés SIW (*Lightning Impulsive Withstand Voltage*) [13].

En la norma CEI 60071-1, se presentan los distintos niveles de aislamiento normalizados, que están de acuerdo a su nivel de tensión nominal de operación [13].

Aislamiento	Tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración	Tensión soportada a impulso tipo rayo
a) Aislamiento externo.		
1) Distancias en el aire y aisladores limpios, en seco:		
Fase – tierra	$0,6 + U_{rw} / 8500$	$1,05 + U_{rw} / 6000$
Fase – fase	$0,6 + U_{rw} / 12700$	$1,05 + U_{rw} / 9000$
2) Aisladores limpios, bajo lluvia	0,6	1,3
b) Aislamiento interno		
1) GIS	0,7	1,25
2) Aislamiento sumergido en un líquido.	0,5	1,10
3) Aislamiento sólido	0,5	1,00
U_{rw} es la tensión soportada a impulso tipo maniobra especificada en kV		

Paso 8: Distancias de separación fase-fase y fase-tierra

Considerando lo expuesto en la norma CEI 60071-2, las distancias en el aire que se presentan en ella pretenden solamente satisfacer los requisitos de la coordinación de aislamiento. Los requisitos de seguridad pueden dar lugar a distancias en el aire substancialmente mayores [13].

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 y para los aislamientos fase-fase, la distancia en el aire mínima para la configuración punta-estructura es aplicable [2]. Si la ubicación del sistema se encuentra sobre los 1 000 m.s.n.m., estas distancias deberían ser corregidas por altitud y temperatura considerando un aumento del 1,25% por cada 100 metros de aumento de altitud [2], como se expone en la tabla 4. Se utiliza la ecuación (14) y (15).

Tensión soportada a impulso tipo rayo normalizada (kV)	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	1100	-
650	1300	-
750	1500	-
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

$$D_{fase-tierra(corregida)} = \left(1 + 1,25\% \cdot \frac{H}{100} \right) \cdot D_{fase-tierra} \quad (14)$$

$$D_{fase-fase(corregida)} = 1,15 \cdot D_{fase-tierra(corregida)} \quad (15)$$

Donde:

H : Es la altura sobre el nivel del mar

Paso 9: Selección del pararrayos

Para seleccionar el descargador adecuado se tomarán como referencia principal los parámetros establecidos por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) de Ecuador para estos dispositivos, parámetros que están planteados en función del nivel de tensión del sistema y que se encuentran dentro de las “Especificaciones técnicas de materiales y equipos del sistema de distribución” [19].

RESULTADOS

Para realizar un adecuado proceso de coordinación de aislamiento, las variables que se deben considerar sin excepción alguna son las siguientes [12, 13]:

El nivel de tensión nominal del sistema, dependiendo de este valor se podrá establecer mediante datos previamente tabulados el valor de la tensión más elevado para los equipos U_m , este valor es el punto de partida para establecer todos los datos referentes a la coordinación de aislamiento. El nivel de contaminación ambiental, puede ocasionar disturbios en las características de los aislamientos externos, afectando principalmente el valor de la distancia de fuga externa del pararrayos y por lo tanto en sus dimensiones físicas.

Altura sobre el nivel del mar del sistema, en función de la misma, los equipos instalados, por lo general los parámetros de funcionamiento son para altitudes de hasta 1 000 m.s.n.m y sobre esta altitud las condiciones ambientales no son las mismas y los dispositivos pueden presentar algún tipo de variante en sus características de operación, por lo que se hace necesario la aplicación de un factor de corrección por altura.

Maniobras de operación en las redes eléctricas, que por lo general son de conexión y reconexión las cuales nos otorgan valores diferentes de sobretensiones.

Niveles de protección del pararrayos, tanto para impulsos tipo rayo y para impulsos por maniobra, estos valores son factores fundamentales para la coordinación de aislamiento, estos permiten establecer la proporción de las sobretensiones debidas a maniobra y a impulsos por descargas atmosféricas.

Longitud de vanos, mientras más corta sea su extensión, más elevado será el nivel de la sobretensión, esto en referencia a sobretensiones por impulsos tipo rayo o de frente rápido.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la secuencia de cálculo expuesta para la coordinación de aislamiento, se presentan desde en la tabla 5, donde se presentan los resultados obtenidos en cada etapa de cálculo.

Tabla 5: Parámetros de operación del sistema Villonaco.				
Paso 1: Descripción de los parámetros de operación del sistema				
Tensión nominal		13,8 kV		
Frecuencia nominal		60 Hz		
Tensión asignada al equipo		17,5 kV		
Tensión asignada al impulso tipo rayo		95 kV		
Tensión asignada soportada a frecuencia industrial		38 kV		
Nivel de contaminación ambiental		I Liviano		
Sistema de puesta a tierra		Sólida puesto a tierra		
Altura sobre el nivel del mar		2 100 m.s.n.m.		
Temperatura ambiente		16/21 °C		
Paso 2: Identificación de los elementos que conforman una red de distribución de media tensión				
Equipo de transformación		Transformadores monofásicos autoprotegidos tipo poste. Transformadores trifásicos tipo poste.		
Equipos de soporte		Crucetas de acero galvanizado universal, perfil “L”		
Conductores		ACSR 4 AWG; ACSR 4/0 AWG ACSR 2 AWG; ACSR 2/0 AWG ACSR 1/0 AWG		
Equipos de protección		Aisladores de porcelana Pararrayos de Óxido Metálico (10 kV)		
Paso 3: Cálculo y dimensionamiento de las características eléctricas del pararrayos				
Voltaje de operación continua U_c		8,37 kV		
Tensión asignada U_T		10,48 kV		
Intensidad nominal descarga I_d		5 kA - 10 kA		
Niveles de protección de pararrayos		$U_{pl} = 30kV$ $U_{ps} = 25kV$		
Paso 4: Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp})				
Temporal	fase – fase	21 kV		
	fase – tierra	14,15 kV		
Frente lento (maniobra)	fase – fase	50 kV		
	fase – tierra	25 kV		
Frente rápido (impulso tipo rayo)	fase – fase	Se calcula directamente U_{cw}		
	fase – tierra			
Paso 5: Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw})				
Temporal		$K_c = 1,0$	fase – fase	21 kV
			fase – tierra	14,15 kV
Frente lento (maniobra)		$K_{cd} = 1,05$ $K_{cd} = 1,1$	fase – fase	52,5 kV
			fase – tierra	27,5 kV
Frente rápido (impulso tipo rayo)		fase – fase fase – tierra	62,14 kV	
Paso 6: Determinación de las tensiones soportadas de especificadas (U_{rw})				
Temporal	Aislamiento interno	$K_s = 1,15$	fase – fase	24,15 kV
			fase – tierra	16,27 kV
	Aislamiento externo	$K_s = 1,05$ $K_a = 1,11$	fase – fase	24,47 kV
			fase – tierra	16,49 kV
Frente lento (maniobra)	Aislamiento interno	$K_s = 1,15$	fase – fase	60,40 kV
			fase – tierra	31,62 kV
	Aislamiento externo	$K_s = 1,05$ $K_a = 1,14$	fase – fase	68,8 kV
			fase – tierra	32,91 kV
Frente rápido (impulso tipo rayo)	Aislamiento interno	$K_s = 1,15$	fase – fase	71,46 kV
			fase – tierra	71,46 kV
	Aislamiento externo	$K_s = 1,05$ $K_a = 1,14$	fase – fase	74,38 kV
			fase – tierra	74,38 kV
Paso 7: Selección de niveles de aislamiento normalizados (U_w)				

Continuación de la Tabla 5	
Nivel de aislamiento normalizado U_w para sobretensiones temporales	38 kV
Nivel de aislamiento normalizado U_w para sobretensiones a impulso tipo rayo.	75 kV 95 kV
Paso 8: Distancias de aislamiento en aire (separación fase-fase y fase-tierra)	
fase – fase	0,20 m
fase – tierra	0,23 m
Paso 9: Selección del pararrayos	
Voltaje de operación continua U_c (kV)	8,4
Tensión asignada U_r (kV)	10
Intensidad nominal de descarga I_d (kA)	5
Nivel de protección U_{pl} (kV)	26 – 36
Nivel de protección U_{ps} (kV)	20 – 29
Distancia de fuga (mm)	280

Los resultados obtenidos cumplen con las disposiciones planteadas por la Empresa Eléctrica Regional de Sur Sociedad Anónima (EERSSA) para el circuito en análisis [12].

Tomando como referencia los niveles de aislamiento establecidos por la Norma Técnica Ecuatoriana (INEN), se puede realizar una comparación entre los criterios establecidos por la norma INEN [20], los criterios establecidos por la EERSSA y los resultados obtenidos en la secuencia de cálculos desarrollada (ver tabla 6), donde se exponen los niveles básicos de aislamiento (NBA), verificando con ello que los valores de aislamiento que el circuito Villonaco posee coinciden con los valores deducidos al aplicar la secuencia de cálculos expuesta [12, 17, 21, 22].

Tabla 6: Comparación de niveles de aislamiento para sistemas de distribución		
Comparación	Tensión nominal (kV)	NBA (kV)
INEN	15	95
EERSSA	13,8	95
Resultados del caso estudio seleccionado	17,5	95

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con la secuencia de cálculos expuestos en este trabajo, permiten demostrar que los niveles de aislamiento que posee el circuito de distribución Villonaco cumple con los requerimientos exigidos en la norma INEN, lo que garantiza la no ocurrencia de fallos debido a sobretensiones.

El método determinístico planteado por la norma CEI 60071-1 presenta un alto grado de efectividad para realizar el análisis de los niveles de aislamiento para los diferentes sistemas de distribución en función de su valor de tensión nominal de operación.

Para sistemas de gama I (de 1 kV a 245 kV) el nivel de aislamiento es dado específicamente para sobretensiones temporales e impulsos tipo rayo, por lo que es necesario realizar la conversión de las tensiones soportadas especificadas tipo maniobra a tensiones temporales equivalente (SDW) y frente rápido equivalente (LIW), verificando que estas queden cubiertas por el nivel de aislamiento seleccionado.

REFERENCIAS

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC) 60071-1, "Coordination Insulation, definitions, principles, and rule ", edition 8.0 2006. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/59657>
- [2] "IEEE Standard for Insulation Coordination--Definitions, Principles, and Rules," in *IEEE Std C62.82.1-2010 (Revision of IEEE Std 1313.1-1996)* , p.1-22, 15 April 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5754137. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5754137>

- [3] MARZINOTTO M., C. Mazzetti and P. Schiaffino, "Statistical Approach to the Insulation Coordination of Medium and High Voltage Cable Lines," *2005 IEEE Russia Power Tech*, 2005, p. 1-8, doi: 10.1109/PTC.2005.4524344.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4524344>
- [4] VOLKER Hinrichsen, y Maximilian Nikolaus Tuzcek. "Descargadores de sobretensión para la coordinación del aislamiento en sistemas de potencia UHV: problemas y soluciones relacionados". *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 129.5 (2012): 326-331. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007%252Fs00502-012-0032-1>
- [5] OZDEMIR S., N. Altin, A. Nasiri and R. Cuzner, "Review of Standards on Insulation Coordination for Medium Voltage Power Converters," in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, p. 236-249, 2021, doi: 10.1109/OJPEL.2021.3065813.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9376926>
- [6] NUNES R. R. and W. d. C. Boaventura, "Insulation Coordination Considering the Switching Overvoltage Waveshape—Part I: Methodology," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2434-2440, Oct. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2028477.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5235739>
- [7] XU C., et al., "Insulation Coordination Design for Grid-Connected Solid-State Transformers," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3125708.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9605596>
- [8] LOPES G. P., G. H. Faria, E. T. W. Neto and M. L. B. Martinez, "Lightning withstand of medium voltage cut-out fuses stressed by nonstandard impulse shapes experimental results," *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2016, pp. 210-214, doi: 10.1109/EIC.2016.7548697.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7548697>
- [9] SHILING Z. and J. Yongliang, "Study on Electrical Insulation Structure Optimization Design of Converter Transformer Bushing," *2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2020, pp. 1292-1299, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136452.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9136452>
- [10] BORGHETTI A., F. Napolitano, C. A. Nucci and F. Tossani, "Advancements in insulation coordination for improving lightning performance of distribution lines," *2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, 2015, pp. 21-31, doi: 10.1109/SIPDA.2015.7339339.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7339339>
- [11] MARTÍNEZ-VELASCO, Juan A y Castro-Aranda, Ferley. (2010). MODELADO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREA PARA CÁLCULOS DE SOBRETENSIÓN DE RAYOS. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 18 (1), 120-131.
Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052010000100013>
- [12] Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. "Normas Técnicas para el Diseño de Redes Eléctricas Urbanas y Rurales". Loja. 2012. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/88804962/Indice-Normas-Tecnicas-2006-Para-El-Disenio-Redes-Elctricas-Urbanas-y-Rurales>
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC) 60071-1, "Coordination Insulation, definitions, principles, and rule", edition 8.0 2006. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/59657>
- [14] IEEE, C62.82.1, "IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules", 2010, en *IEEE Std C62.82.1-2010 (Revisión de IEEE Std 1313.1-1996)*, vol., No., Págs. 1-22, 15 de abril de 2011, doi: 10.1109 / IEEESTD.2011.5754137. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5754137/references#references>
- [15] IEEE, C62.82.1, "IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules", 2010, en *IEEE Std C62.82.1-2010 (Revisión de IEEE Std 1313.1-1996)*, vol., No., Págs. 1-22, 15 de abril de 2011, doi: 10.1109 / IEEESTD.2011.5754137. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5754137/references#references>
- [16] J W. H. Villacís Pazmiño, "Efecto de las Sobretensiones de Frecuencia Industrial en la Selección y Coordinación de Aislamiento de Redes de Distribución". Quito: EPN, 1986. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8741>
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC) 60071-2, "Coordination Insulation, Application Guide", edition 3.0 1996. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/27072>
- [18] SANGKAKOOL, S., & Petcharaks, K. (2010, May). "A computer software for insulation co-ordination according to IEC 60071-2". In *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Confernce on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology* (p. 293-297). IEEE. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5491484>
- [19] VILLALBA Noriega, "Comparación entre normas IEEE e IEC sobre coordinación de aislamiento (en sistemas de distribución hasta 69kV)". 2016. EPN, Quito 2016. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14758?mode=full>
- [20] Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 127:98. "Transformadores, Niveles de aislamiento". Quito, 1998. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjHjvbd7u_yAhUaTTABHWSIDVoQFn_oECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2F2127-1.pdf&usq=AOvVaw2QTCYjNgDtsZ9fi9eWoJwp
- [21] CORTELLONI J. C., "Principios para la coordinación de los niveles de aislación de aparatos e instalaciones en redes eléctricas de A.T. Rosario", 2006. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiMzr7v7u_yAhVPSzABHQF8DvoQFn_oECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.firro.utn.edu.ar%2Frepositorio%2Fcatredras%2Felectrica%2F5_ano%2Ftransmision_distribucion_energia_electrica%2Ffiles%2FAislacion.pdf&usq=AOvVaw2SNbYnJlbbD_s0DaRgAwlc
- [22] Ministerio de Electricidad y Energías Renovables MEER, Catálogo Digital: "Redes de Distribución de Energía Eléctrica: Manual de Unidades de Construcción – Transformadores", 2013. Disponible en: <https://docplayer.es/12978168-Manual-de-las-unidades-de-construccion.html>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Marianela Del Cisne Carrión González: <https://orcid.org/0000-0001-6164-8669>

Diseño de la investigación, participó en el análisis de los resultados, en la corrida del software y su interpretación, en la redacción del borrador del artículo, en la revisión crítica de su contenido y en la aprobación del informe final.

Franklin Gustavo Jiménez Peralta: <https://orcid.org/0000-0002-4976-1017>

Participó en la recolección de datos, en el procesamiento de los mismos y el análisis de los resultados, corrida del software y su interpretación, en la revisión crítica del contenido del artículo y en la aprobación del informe final.

Rodolfo Pabel Merino Vivanco: <https://orcid.org/0000-0003-2713-0588>

Participó en la recolección de datos, en el procesamiento de los mismos, en el análisis de los resultados y en la aprobación del informe final.

Jorge Enrique Carrión González: <https://orcid.org/0000-0003-1869-4541>

Participó en la recolección de datos, en el procesamiento de los mismos, en el análisis de los resultados y en la aprobación del informe final.

Andy Fabricio Vega León: <https://orcid.org/0000-0003-0106-6880>

Revisión y elaboración de la bibliografía, apoya en la revisión del estado del arte, en el análisis de los resultados y en la aprobación del informe final.